

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Edifícios municipais e consumos de energia

Vando Filipe Simões Daniel

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Professora Doutora Ana Estanqueiro
Professora Doutora Teresa Simões

2018

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço às minhas orientadoras Professora Doutora Ana Estanqueiro e Doutora Teresa Simões, pela disponibilidade, conhecimentos transmitidos e pela ajuda, que em muitos momentos foi fulcral na evolução do presente trabalho.

Ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) pelos meios e recursos disponibilizados para a realização do trabalho. Não posso esquecer do apoio dado pelo António Couto, João Silva, Duarte Santos, Geuffer Garcia, Rita Silva, João Cravinho e Guilherme Luz. A todos vós a minha gratidão pelos conhecimentos transmitidos e vivências ao longo deste período.

Aos responsáveis da Câmara Municipal de Torres Vedras, nomeadamente à Engenheira Sandra Pedro, pela oportunidade dada de por em prática todos os conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico.

Ao Centro de Informação Aeroespacial do Exército (CIGeoE) pela cedência de informação relevante, nomeadamente do modelo digital do terreno da cidade de Torres Vedras.

Ao Sérgio, Ricardo, Tiago, Diogo C. e Diogo A., agradeço toda preocupação, a força, o apoio e os conselhos dados ao longo de toda a minha vida académica e pessoal.

Nunca é demais agradecer à minha família que sempre me apoiou. Aos meus pais e irmã, mesmo quando havia poucos recursos nunca me negaram o conhecimento e sempre me ensinaram a lutar para conquistar os meus sonhos.

Um agradecimento do fundo do coração a ti, Teresinha, não há palavras que descrevam toda a tua ajuda, carinho, conselhos e apoio incansável neste caminho que temos vivido.

A todos, o meu sincero agradecimento.

Resumo

Ao longo dos últimos anos, a União Europeia estabeleceu políticas energéticas e climáticas com o intuito de reduzir o consumo dos combustíveis fósseis, de prevenir as alterações climáticas, o aquecimento global e emissão de gases com efeito de estufa. Para incentivar e promover as políticas estabelecidas foram criados diversos programas europeus e iniciativas, como é exemplo a iniciativa Europeia “Pacto dos Autarcas” (“Covenant of mayors”), ao qual diversos municípios em toda a Europa já aderiram.

Muitas dessas medidas aplicadas deram um forte papel às energias renováveis, tornando-as numa aposta para uma mudança no paradigma energético e revelando uma aposta segura para uma sustentabilidade energética no futuro.

Em Portugal a produção descentralizada de energia elétrica tem assumido uma elevada importância, em particular com a publicação de diplomas incentivadores da instalação de sistemas de energias renováveis para produção de eletricidade. Atualmente encontra-se em vigor o Decreto-Lei nº153 de 20 de outubro de 2014, o qual estabelece um enquadramento legal único para a produção de energia elétrica para Unidades de Produção para Autoconsumo (UPAC) e para as Unidades de Pequena Produção (UPP).

Neste contexto, e na sequência da adesão da cidade de Torres Vedras ao Pacto dos Autarcas, pretende-se com este trabalho avaliar a possibilidade de instalação de sistemas de produção de energia elétrica com base em tecnologias de energias renováveis em edifícios propostos pela C. M. de Torres Vedras, mais concretamente no edifício Multisserviços e no Centro Educação Ambiental. Para tal, é estimado o potencial solar e eólico na zona onde se encontram os edifícios selecionados, analisando a viabilidade económica e os consumos elétricos dos mesmos. É ainda analisado o enquadramento no diploma referido, com vista à possível implementação de Unidades de Produção (UP) com tecnologias renováveis (solar e eólica) nestes edifícios para produção descentralizada de energia elétrica.

Palavras-Chave: Potencial solar, Potencial eólico, DL N°153/2014.

Abstract

Over the last few years, the European Union has established energy and climate policies to reduce the consumption of fossil fuels, to mitigate climate change, global warming and greenhouse gas emissions. In order to encourage and promote policies, a number of European programs and initiatives have been created, such as the European Covenant of Mayors initiative, which has been joined by several municipalities across Europe.

Many of these measures have given a strong role to renewable energies to lead the change in the energy paradigm and future energy sustainability.

In Portugal the decentralized production of electricity has assumed high importance, in particular with the publication of diplomas encouraging the installation of renewable energy systems for the production of electricity. Currently, Decree-Law no. 153 of October 20, 2014, is in force, which establishes a single legal framework for the production of electricity for Units of Production for Self-consumption (UPAC) and for Small Production Units (UPP).

In this context, and following the adhesion of the city of Torres Vedras to the Covenant of Mayors, this work intends to evaluate the possibility of installing electric energy production systems based on renewable energy technologies in buildings proposed by Torres Vedras city council, more concretely in the Multiservice building and in the Environmental Education Center. In order to do so, the solar and wind potential in the area where the selected buildings are located was estimated and the economic viability and the electric consumptions thereof was analyzed. The framework in the mentioned diploma, with a view to the possible implementation of Production Units (UP) with renewable technologies (solar and wind) in these buildings for decentralized production of electric energy was also part of the analysis.

Keywords: Solar Potential, Wind Potential, Decree Law N°. 153/2014

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract	v
Índice de Figuras	xi
Lista de Símbolos e Acrónimos	xxi
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	2
2. Desafios energéticos em meios urbanos.....	3
2.1 Cidades sustentáveis e cidades inteligentes.....	3
2.2 Cidade de Torres Vedras e edifícios municipais	4
2.3 Energias renováveis em meio urbano.....	6
2.3.1 Recurso eólico em meio urbano	7
2.3.2 Recurso solar em meio urbano	12
2.4 Legislação para a produção descentralizada de energia elétrica	16
2.4.1 Unidades de Produção para Autoconsumo (UPAC)	17
2.4.2 Unidades de Pequena Produção (UPP)	19
3. Metodologia	21
3.1 Perfil de Consumo	21
3.2 Modelo digital da cidade de Torres Vedras e dos edifícios.....	22
3.3 Potencial Solar	23
3.4 Potencial Eólico.....	27
3.5 Análise energética	30
3.6 Análise económica	31
4. Aplicação da Metodologia Desenvolvida.....	37
4.1 Potencial solar da cidade de Torres Vedras e nos edifícios municipais	37
4.2 Potencial eólico da cidade de Torres Vedras e edifícios municipais.....	42
4.3 Análise energética aos edifícios municipais.....	45
4.4 Análise económica aos edifícios municipais.....	55
5. Conclusão.....	65
Referências Bibliográficas	67
A. Desfiladeiros Urbanos	71
B. Tipos de microturbinas eólicas.....	73

C.	Modelos solares.....	77
D.	Análise Solar Radiation.....	79
E.	Dimensionamento de um sistema fotovoltaico	81
F.	Curvas de potência	83
G.	Análise ao mercado	87

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Principais conceitos para a base do desenvolvimento sustentável [9].....	3
Figura 2.2 - Edifício Multisserviços da C. M. de Torres Vedras e Centro de Educação Ambiental. Informação acerca das coberturas dos edifícios e suas envolventes.	5
Figura 2.3-Sistema solar fotovoltaico e microturbina eólica da instalação de microprodução instalado no Centro de Educação Ambiental de Torre Vedras.....	5
Figura 2.4 - Curva de potência da turbina Proven instalada no edifício Centro de Educação Ambiental. A linha tracejada corresponde aos valores retirados da ficha técnica da microturbina e a linha continua aos valores aplicados no cálculo de produção de energia elétrica.....	6
Figura 2.5 - Esquematização das subcamadas de inércia, de rugosidade e da cobertura urbana. A linha tracejada é a altura média dos edifícios e nas linhas continuas o comportamento do fluxo nas camadas [14].	7
Figura 2.6 - Perfil da camada limite urbana [11].	7
Figura 2.7 - Curva de Weibull para diferentes valores de parâmetros k e A [18].....	9
Figura 2.8 – Velocidade do vento (esquerda) e fluxo de potência incidente (direita) na cidade de Torres Vedras [11].	11
Figura 2.9 - Previsão e potência instalada ao nível do mercado mundial entre os anos de 2009-2020 [22].	11
Figura 2.10 – Imagens representativas da declinação solar, do azimute e altura solar [28].....	13
Figura 2.11 – Potencial solar fotovoltaico numa zona residencial da cidade de Lisboa [33].	15
Figura 2.12 - Células fotovoltaicas, onde (a) corresponde à célula policristalino de 1º geração e (b) módulos de película fina semitransparente de silício amorfo de 2º geração [27] e (c) representação da constituição de uma célula multijunção e do espectro solar captado por cada um dos materiais (Adaptado de NREL CPV101).....	15
Figura 2.13 - Percentagem anual de produção mundial das diversas tecnologias solares fotovoltaicas [37]	16
Figura 3.1 - Metodologia aplicada para a realização dos casos de estudo propostos.....	21
Figura 3.2 - Metodologia aplicada na recolha de informação para a criação dos modelos digitais da cidade de Torres Vedras, dos edifícios municipais e da sua envolvente urbana.	22
Figura 3.3- Componentes da radiação solar o Solar Analyst: a) Viewshed, b) Sunmap e c) Skymap [31].	23
Figura 3.4 - Determinação das componentes da radiação solar direta através da sobreposição do Viewshed com o Sunmap (a) e da radiação difusa com a sobreposição do Viewshed com o Skymap (b) [31].	24
Figura 3.5 - Metodologia aplicada na determinação do potencial solar incidente na cidade de Torres Vedras [adap. 60].	25
Figura 3.6 - Metodologia aplicada na determinação do valor de produção elétrica dos sistemas fotovoltaicos [adap. 62].....	26

Figura 3.7 – Representação da configuração do sistema fotovoltaico aplicado no <i>EnergyPlus</i> [57].	27
Figura 3.8 - Metodologia aplicada na determinação do potencial eólico incidente nos edifícios em análise.	29
Figura 3.9 - Representação de um diagrama de carga elétrico de um edifício com UPAC. (A) Energia elétrica consumida pelo edifício fornecida pela RESP, (B) Energia elétrica produzida pela UPAC e consumida no edifício e (C) Excedente de energia elétrica e injetada na RESP.	30
Figura 3.10 - Valores mensais do ano de 2016 da média aritmética simples dos preços de fecho do OMIE para Portugal.	34
Figura 4.1 - Modelo digital de elevação da cidade da cidade de Torres Vedras aplicada no estudo do potencial solar. É possível identificar a inclinação da cobertura do edifício Multisserviços da C. M. de Torres Vedras.	37
Figura 4.2 – Média mensal da radiação global, direta e difusa para a cidade de Torres Vedras, valores obtidos no SCE-Climas.	37
Figura 4.3 - Mapa da radiação global anual para a cidade de Torres Vedras.	38
Figura 4.4 - Radiação global anual incidente na cobertura dos edifícios Multisserviços da C. M. de Torres Vedras.	38
Figura 4.5 - Radiação global anual incidente na cobertura dos edifícios CEA da C. M. de Torres Vedras.	39
Figura 4.6 - Representação à esquerda do edifício Multisserviços com uma possível organização dos equipamentos solar fotovoltaicos através do plug-in <i>Skelion</i> e à direita representação do edifício CEA aplicado no <i>EnergyPlus</i> para estimativa de produção dos equipamentos solar fotovoltaico.	40
Figura 4.7 - Produção total horária dos equipamentos solares monocristalino e policristalino para o edifício Multisserviços.	40
Figura 4.8 - Produção total horária dos equipamentos solares monocristalino e policristalino para o edifício CEA.	41
Figura 4.9 – Frequência de ocorrência e direção da série de dados da velocidade do vento para o edifício Multisserviços, obtidos no modelo mesoescala para a altura de 80m.	42
Figura 4.10 - Maquete urbana aplicada no estudo do potencial eólico nos edifícios propostos para análise por parte do município de Torres Vedras.	42
Figura 4.11 - Maquete da zona urbano do edifício Multisserviços aplicada no <i>UrbaWind</i> . A malha abrange o edifício e a sua envolvente, sendo ainda indicado os pontos de possíveis locais de interesse para a instalação de uma microturbina.	42
Figura 4.12 -Malha da velocidade média do vento no edifício Multisserviços. Imagem da esquerda corresponde à altura de 12 m acima do solo e da direita corresponde a 15 m acima do solo.	43
Figura 4.13 - Frequência de ocorrência da velocidade do vento e direção para o local de possível instalação da microturbina para o edifício Multisserviços, obtidos no <i>UrbaWind</i> .	43
Figura 4.14 – Curvas de potência das turbinas VAWT e HAWT aplicadas para a realização do trabalho. A linha tracejada corresponde aos valores retiradas das fichas técnicas das respetivas	

microturbinas e a linha contínua aos valores aplicados no cálculo de produção de energia elétrica.	44
Figura 4.15 - Estimativa de produção mensal de energia elétrica para a microturbina VAWT 5 kW no edifício Multisserviços.	44
Figura 4.16 – Representação dos pontos analisados para o edifício do CEA.	45
Figura 4.17 - Estimativa de produção horária de energia elétrica para a microturbina Proven instalada no edifício CEA.	45
Figura 4.18 - Consumo mensal de energia elétrica ativa do edifício Multisserviços obtido a partir das faturas de eletricidade.	46
Figura 4.19 - Perfil de consumo médio semanal de energia elétrica do edifício Multisserviços.	46
Figura 4.20 – Perfil de consumo semanal de energia elétrica ativa do edifício Multisserviços ao longo do ano.	47
Figura 4.21 - Comportamento mensal do consumo elétrico no edifício Multisserviços com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino.	49
Figura 4.22 - Comportamento mensal do consumo elétrico no edifício Multisserviços com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e microturbina VAWT 5 kW.	49
Figura 4.23 -Diagrama de produção e consumo elétrico de uma semana típica de Inverno do edifício Multisserviços com implementação da UPAC com um sistema híbrido.	50
Figura 4.24 - Diagrama de produção e consumo elétrico de uma semana típica de Verão do edifício Multisserviços com implementação da UPAC com um sistema híbrido.	50
Figura 4.25 - Consumo mensal de energia elétrica ativa do edifício CEA obtidos a partir das faturas elétricas.	51
Figura 4.26 - Perfil de consumo médio semanal de energia elétrica do edifício Multisserviços.	51
Figura 4.27 - Perfil de consumo mensal de energia elétrica ativa do edifício CEA.	52
Figura 4.28 - Comportamento mensal do consumo elétrico no edifício CEA com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino.	53
Figura 4.29 - Comportamento mensal do consumo elétrico no edifício CEA com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e equipamentos em regime de microprodução.	54
Figura 4.30 - Diagrama de produção e consumo elétrico de uma semana típica de Inverno do edifício CEA com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e equipamentos em regime de microprodução.	55
Figura 4.31 - Diagrama de produção e consumo elétrico de uma semana típica de Verão do edifício CEA com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e equipamentos em regime de microprodução.	55
Figura 4.32 - Tarifas de energia elétrica ativa e redes de energia elétrica ativa aplicadas no edifício Multisserviços [Faturas elétricas 2016].	57
Figura 4.33 - Períodos horários onde é aplicado as tarifas energéticas para o período de Verão e Inverno para o edifício Multisserviços.	57

Figura 4.34 - Custo mensal de aquisição de energia elétrica para o edifício Multisserviços.....	58
Figura 4.35 – Receita mensal da UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino instalada.....	58
Figura 4.36 - Receita mensal da UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino e VAWT de 5 kW.	61
Figura 4.37 Tarifas de energia elétrica ativa e redes de energia elétrica ativa aplicadas no edifício CEA [faturas elétricas 2016].	61
Figura 4.38 - Períodos horários onde é aplicado as tarifas energéticas para o período de Verão e Inverno para o CEA.	61
Figura 4.39 - Custo mensal de aquisição de energia elétrica para o edifício CEA.	62
Figura 4.40 - Receita mensal da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino.	63
Figura 4.41 - Receita mensal da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e o sistema híbrido em regime de microprodução.	63
Figura A.1 - Representação de um desfiladeiro urbano regular e as dimensões principais a serem consideradas num conjunto de edifícios (baseado em [11]).	71
Figura A.2 - Regime escoamento isolado [11].	72
Figura A.3 - Regime escoamento esteira de interferência [11].	72
Figura A.4 - Regime de escoamento rasante [11].	72
Figura B.1 - Exemplos de turbinas do tipo HAWT: (a) Swift, (b) Ecletic, (c) Fortis Montana, (d) Scirocco, (e) Tulipo [23].	73
Figura B.2 - Exemplos de microturbinas do tipo VAWT: (a) Darrieus, (b) Giromill, (c) Gorlov e (d) Savonius [22].	74
Figura D.1 - Impacto na alteração dos valores de <i>Calculations Directions</i> no tempo de duração da simulação e no valor de radiação solar global obtido para cada edifício analisado.	79
Figura D.2 - Impacto na alteração dos valores de <i>Sky Size</i> no tempo de duração da simulação e no valor de radiação solar global obtido para cada edifício analisado.	79
Figura D.3 - Impacto na alteração dos valores de <i>Azimuth</i> no tempo de duração da simulação e no valor de radiação solar global obtido para cada edifício analisado.	79
Figura D.4 - Impacto na alteração dos valores de <i>Zenite</i> no tempo de duração da simulação e no valor de radiação solar global obtido para cada edifício analisado.	80

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Características técnicas do módulo solar instalado no sistema Microprodução do Centro Educação Ambiental de Torres Vedras	6
Tabela 2.2- Valores de comprimento de rugosidade para diferentes tipos de terreno [11].	8
Tabela 2.3 - Valores de α conforme o tipo de terreno em estudo [15].	8
Tabela 2.4 - Vantagens e desvantagem das microturbinas eólicas em ambiente urbano.	12
Tabela 2.5 - Taxa de registo da UP.	17
Tabela 2.6 - Variação do valor da tarifa de referência com a tecnologia de produção de energia elétrica a ser utilizada na UPP.	19
Tabela 3.1 - Valores dos parâmetros Sky Size, Calculation directions, Zenith divisions e Azimuth divisions a serem aplicados na ferramenta Solar Radiation do ArcGIS.	24
Tabela 3.2 – Valores de rugosidade aplicados nos <i>UrbaWind</i> para identificação do recurso eólico nos edifícios propostos para análise.	28
Tabela 3.3 – Parâmetros económicos aplicados para a realização da análise económica à UPP e UPAC.	33
Tabela 4.1 - Valores de proporção difusa e transmissividade aplicado no mapa do potencial solar da cidade de Torres Vedras.	37
Tabela 4.2 – Valores de radiação solar global obtidos na cobertura do edifício Multisserviços da C. M. de Torres Vedras.	38
Tabela 4.3 - Valores de radiação solar global obtidos na cobertura do CEA da C. M. de Torres Vedras.	39
Tabela 4.4 - Características técnicas dos módulos fotovoltaicos aplicados para a realização do trabalho.	39
Tabela 4.5 – Identificação das áreas, número de módulos e potência a ser instalada no edifício Multisserviços.	40
Tabela 4.6 – Valores de produção de energia elétrica das tecnologias solares fotovoltaicas no edifício Multisserviços.	40
Tabela 4.7 - Identificação das áreas, número de módulos e potência a ser instalada no edifício CEA.	41
Tabela 4.8 – Valores de produção de energia elétrica das tecnologias solares fotovoltaicas no edifício CEA.	41
Tabela 4.9 – Valores da velocidade média e parâmetros de Weibull obtidos da série de dados da velocidade do vento para a altura de 13m no edifício Multisserviços.	43
Tabela 4.10 – Valores de produção de energia elétrica anual das microturbinas analisadas obtidos pelo <i>UrbaWind</i> e pelo coeficiente de calibração que foi aplicado à série da velocidade do vento. .	44
Tabela 4.11 - Valores da velocidade média e parâmetros de Weibull obtidos na série de dados da velocidade do vento para a altura de 12 m no edifício CEA.	45
Tabela 4.12 - Impacto energético de UPAC com tecnologia solar fotovoltaica no edifício Multisserviços no primeiro ano de funcionamento.	47

Tabela 4.13 - Impacto energético de UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo policristalino e microturbinas eólicas (sistema híbrido) no edifício Multisserviços no primeiro ano de funcionamento.....	48
Tabela 4.14 - Impacto energético de UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e microturbinas eólicas (sistema híbrido) no edifício Multisserviços no primeiro ano de funcionamento.....	48
Tabela 4.15 - Impacto energético de UPAC com tecnologia solar fotovoltaica no edifício CEA, no primeiro ano de funcionamento.....	52
Tabela 4.16 - Impacto energético de UPAC com tecnologia solar fotovoltaica e equipamentos em regime de microprodução já instalados no edifício CEA para o primeiro ano de funcionamento...	53
Tabela 4.17 - Valores de aquisição dos equipamentos para as UP solar fotovoltaica. Valores resultantes da análise ao preço praticados no mercado português.	55
Tabela 4.18 - Valores de aquisição dos equipamentos para as UP microturbina eólica. Valores resultantes da análise ao preço praticados no mercado português e europeu.	56
Tabela 4.19 – Investimento inicial para implementação de tecnologias solares fotovoltaicas no edifício Multisserviços.	56
Tabela 4.20 – Indicadores económicos das tecnologias solares fotovoltaicas para uma UPP a ser implementada no edifício Multisserviços.	56
Tabela 4.21 - LCOE das tecnologias solares fotovoltaicas analisadas para a UP a ser implementadas no edifício Multisserviços.	57
Tabela 4.22 - Indicadores económicos da análise económica a uma UPAC com tecnologias solares fotovoltaicas a ser implementada no edifício Multisserviços.....	58
Tabela 4.23 - Investimento inicial para implementação de um sistema híbrido com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino e microturbinas eólicas no edifício Multisserviços.....	59
Tabela 4.24 - Investimento inicial para implementação de um sistema híbrido com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e microturbinas eólicas no edifício Multisserviços.....	59
Tabela 4.25 - Indicadores económicos da análise efetuada a uma UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino e microturbinas no edifício Multisserviços.....	59
Tabela 4.26 - Indicadores económicos da análise efetuada a uma UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino e microturbinas no edifício Multisserviços.	60
Tabela 4.27 - LCOE dos sistemas híbridos com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino e tecnologia eólica analisados para a UPAC a ser implementadas no edifício Multisserviços.....	60
Tabela 4.28 - LCOE dos sistemas híbridos com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino e tecnologia eólica analisados para a UPAC a ser implementadas no edifício Multisserviços.	60
Tabela 4.29 – Investimento inicial para implementação de tecnologias solares fotovoltaicas no edifício CEA.....	62
Tabela 4.30 - Indicadores económicos da análise económica a uma UPAC com tecnologias solares fotovoltaicas a ser implementadas no edifício CEA.	62
Tabela 4.31 - LCOE das tecnologias solares analisadas para a UPAC a ser implementada no edifício CEA.....	63

Tabela B.1 - Características das microturbinas do tipo HAWT [23].	73
Tabela B.2 - Características das microturbinas do tipo VAWT [22] [23] [56].	74
Tabela F.1 - Coeficientes aplicados para a melhor representação das curvas de potência das microturbinas VAWT analisadas.	83
Tabela F.2 - Coeficientes aplicados para a melhor representação das curvas de potência das microturbinas HAWT analisadas.	84
Tabela F.3 - Coeficientes aplicados para a melhor representação das curvas de potência da microturbina instalada no CEA.	85
Tabela G.1 - Custos associados aos módulos fotovoltaicos do tipo policristalino identificados nos mercados português e europeu.	87
Tabela G.2 - Custos associados aos inversores solares de 15 kW identificados no mercado português.	87
Tabela G.3 - Custos associados aos inversores solares de 20 kW identificados no mercado português.	88
Tabela G.4 - Custos associados aos inversores solares de 25 kW identificados no mercado português.	88
Tabela G.5 - Custos associados às bobines de 100 m de cabo solar identificados no mercado português.	88
Tabela G.6 - Custos associados às turbinas eólicas do tipo HAWT de 5 kW identificados no mercado português.	88
Tabela G.7 - Custos associados às turbinas eólicas do tipo HAWT de 3 kW identificados nos mercados português e europeu.	88
Tabela G.8 - Custos associados às turbinas eólicas do tipo HAWT de 1,5 kW identificados nos mercados português e europeu.	89
Tabela G.9 - Custos associados às turbinas eólicas do tipo VAWT de diferentes potências identificado no mercado europeu.	89
Tabela G.10 – Custo associado à torre eólica com altura de 13 m identificado no mercado europeu.	89
Tabela G.11 – Custo associado ao inversor eólico de 2,2 kW identificado no mercado português.	89
Tabela G.12 - Custo associado ao inversor eólico de 4,4 kW identificado no mercado português.	89
Tabela G.13 - Custo associado ao inversor eólico de 6,2 kW identificado no mercado português.	89

Lista de Símbolos e Acrónimos

A	Parâmetro de escala da distribuição de Weibull
a	Taxa de atualização (%)
A_t	Área da turbina eólica (m^2)
$AngIn_{\theta,\alpha}$	Ângulo de incidência entre o centróide do setor do céu e o eixo normal da superfície (rad)
C	Comprimentos dos blocos de edifícios (m)
C_{calib}	Coefficiente de calibração aplicado à série de dados de velocidade do vento
C_p	Coefficiente de potência (%)
$CDAE_{m,d,h}$	Consumo Discriminado Agregado Estimado (kWh)
$Consumo_m$	Consumo real de energia elétrica ativa (kWh)
Dif_{Total}	Radiação solar difusa incidente na célula (Wh/m^2)
$Dif_{\theta,\alpha}$	Radiação solar difusa para cada sector do mapa do céu (Wh/m^2)
Dir_{Total}	Radiação solar direta incidente na célula (Wh/m^2)
$Dir_{\theta,\alpha}$	Radiação solar direta para cada sector do mapa de Sol (Wh/m^2)
Dur	Período de tempo para análise (s)
d	Altura do deslocamento (m)
$d_{O\&M}$	Despesas de Operação e Manutenção dos equipamentos (%)
Div_{azi}	Número de divisões do azimuth
E_{carga}	Consumo de energia elétrica nos edifícios (Wh)
$E_{eól}$	Energia elétrica produzida pela turbina (Wh)
E_j	Energia elétrica produzida no ano j (Wh)
E_{UPAC}	Energia elétrica produzida pela UPAC (Wh)
E_{RESP}	Excedente de energia elétrica produzida pela UPAC (Wh)
$F(\bar{u})$	Função de probabilidade acumulada de Weibull
$f(\bar{u})$	Função de distribuição de Weibull
$Global_{Total}$	Radiação solar global (Wh/m^2)
H	Altura do edifício (m)
I	Irradiância no topo da atmosfera (W/m^2)
I_j	Investimento efetuado no ano j (€)
$I_{máx,inversor}$	Corrente máxima de entrada do inversor (A)
I_0	Constante solar (W/m^2)
I_t	Investimento inicial (€)
$Imp_{eletricidade}$	Imposto de consumo de energia elétrica (€/kWh)

J	Dia Juliano
k	Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
L	Largura dos edifícios (m)
$m(\theta)$	Comprimento do caminho ótico relativo
$N_{máx,Módulos}$	Número máximo de módulos fotovoltaicos a instalar
$N_{Módulos}$	Número de módulos fotovoltaicos a instalar
$N_{P,máx.}$	Número máximo de módulos fotovoltaicos ligados em paralelo
$N_{S,máx.}$	Número máximo de módulos fotovoltaicos ligados em série
$N_{S,min.}$	Número mínimo de módulos fotovoltaicos ligados em série
n	Tempo de vida útil dos equipamentos (<i>anos</i>)
O&M	Operação e Manutenção
P_{dif}	Proporção difusa
P_{disp}	Potência disponível no vento (W)
P_{FV}	Potência total instalada (W)
$P_{máx. inst}$	Limite máximo de potência a ser instalada (W)
$P_{máx. inversor,DC}$	Potência máxima de entrada do inversor (W)
$P_{módulo}$	Potência do módulo fotovoltaico (W)
P_{mec}	Potência mecânica disponível no veio da turbina (W)
$P_{m,d,h}$	Perfil de consumo indicativo
R_{glb}	Radiação global normal (W/m^2)
R_j	Receita bruta obtida para o ano j (€)
$R_{L,j}$	Receita líquida obtida para o ano j (€)
R_{RESP}	Receita proveniente da excedente produção vendida à RESP (€)
R_{UPAC}	Receita proveniente da UPAC (€)
S	Distância entre edifícios com direção perpendicular ao vento (m)
$SkyGap_{\theta,\alpha}$	Fração de abertura para o setor do céu
$SunDur_{\theta,\alpha}$	Duração representada pelo sector do céu (h)
$SunGap_{\theta,\alpha}$	Fração de abertura para o sector de mapa solar
T_r	Período de recuperação (<i>anos</i>)
$T_{elétrica}$	Valor total da tarifa elétrica (€/kWh)
$T_{Energia,h}$	Tarifa de energia elétrica ativa (€/kWh)
$T_{Redes,h}$	Tarifa de redes de energia elétrica ativa (€/kWh)
t	Tempo (s)
V_{MPP}	Tensão no ponto de potência máxima (V)
V_{OC}	Tensão em circuito aberto (V)
$V_{máx,inversor}$	Tensão máxima de entrada do inversor (V)

$V_{\min, \text{inversor}}$	Tensão mínima de entrada do inversor (V)
v_{Calib}	Velocidade horária do vento aplicada com o coeficiente de calibração (m/s)
$v_{\text{Mesoscala}}$	Velocidade horária do vento da série de dados obtidos no modelo mesoscala (m/s)
$\overline{v_{\text{Mesoscala}}}$	Velocidade do vento média do modelo mesoscala (m/s)
$\overline{v_{\text{UrbaWind}}}$	Velocidade do vento média obtida no UrbaWind (m/s)
W	Distância entre edifícios com a mesma direção de vento (m)
$Weight_{\theta, \alpha}$	Proporção de radiação difusa num dado setor do céu em relação a todos os setores
ΔU	Coefficiente de Temperatura de Tensão ($\%/^{\circ}C$)
$u(z)$	Velocidade do vento horizontal (m/s)
\bar{u}	Velocidade média do vento ($\frac{m}{s}$)
u_*	Velocidade de atrito (m/s)
z	Altura acima do solo (m)
z_0	Comprimento de rugosidade (m)
z_{Ref}	Altura acima do solo de referência (m)
α_s	Altura Solar ($^{\circ}$)
α	Ângulo de azimuth (Solar Radiation) (rad)
δ	Declinação Solar ($^{\circ}$)
θ	Ângulo zénite (Solar Radiation) (rad)
κ	Constante de Von Karman
ρ	Densidade (kg/m^3)
τ	Transmissividade
ϕ	Latitude local ($^{\circ}$)
Ψ_s	Azimuth solar ($^{\circ}$)
ω_s	Ângulo horário Solar ($^{\circ}$)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLU	Camada Limite Urbana
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
GEE	Gases de Efeito de Estufa
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
IEC	International Electrotechnical Commission
LCOE	Levelized Cost of Electricity ($\text{€}/kWh$)
LES	Large Eddy Simulation

OMIE	Operador do Mercado Ibérico de Energia
ONU	Organização das Nações Unidas
PASE	Plano de Ação para a Sustentabilidade Energética
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information Systems
RESP	Rede elétrica de Serviço Público
ROI	Retorno do Investimento
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
STC	Standard Test Conditions
TIR	Taxa Interna de Rentabilidade
VAL	Valor Atual Líquido
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
WWEA	World Wind Energy Association
UE	União Europeia
UP	Unidade de produção
UPAC	Unidade de produção para Autoconsumo
UPP	Unidade de Pequena Produção

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Nos últimos anos verificou-se, por parte das entidades governamentais, uma crescente preocupação com temas como o aquecimento global e as suas consequências. Prova disso é a política energética e climática estabelecida pela União Europeia (UE), a qual estabelece as seguintes metas para o horizonte 2020 [1]:

- Redução em 20% dos Gases de Efeito de Estufa (GEE) em relação aos valores de referência de 1990;
- Aumento da quota-parte de energia final consumida proveniente de fontes de energia renovável em 20% e de fontes renováveis no setor dos transportes em 10%;
- Redução de 20% do consumo de energia final através da aplicação de medidas de eficiência energética.

Para o cumprimento das metas estabelecidas por parte da UE, foi criado pela mesma uma iniciativa europeia denominada “Pacto dos Autarcas”, ao qual diversas autarquias Portuguesas aderiram nos últimos anos (Lisboa, Porto entre outros). Para tal, os Signatários voluntariam-se e comprometem-se a atingir o objetivo proposto pela União Europeia de 20% de redução das emissões de CO₂, através da implementação de um Plano de Ação para a Sustentabilidade Energética (PASE). Em 2011, o município de Torres Vedras aderiu a este movimento tendo como compromisso a redução em 20% das emissões de GEE e um aumento em 20% da energia consumida com origem em fontes de energia renovável [2].

Atualmente, os centros urbanos são responsáveis por consumirem mais de 75% da produção mundial de energia e de gerar cerca de 80% das emissões dos GEE [3]. Perspetiva-se que os centros urbanos apresentem uma tendência de crescimento ao nível da densidade populacional ao longo das próximas décadas. Neste sentido, é necessário criar condições habitáveis e sustentáveis para acompanhar esse crescimento e minimizar a sua vulnerabilidade aos efeitos das alterações climáticas. Surge então a necessidade de criar/implementar os conceitos de “cidades sustentáveis” e “cidades inteligentes” para uma perspetiva de futuro ao nível do crescimento sustentável destes centros urbanos [4].

Um dos caminhos a tomar para a implementação de cidades sustentáveis passa pela possibilidade de integração de sistemas de produção de energia elétrica de origem renovável nos centros urbanos. A integração destes sistemas nos centros urbanos demonstra benefícios ao nível ambiental, económico e social, mas traz inúmeros desafios ao nível técnico, comportamental, económico e político que precisam de ser superados para a implementação do conceito de sustentabilidade urbana [5].

Em 2 de Novembro de 2007 o Governo Português publicou o Decreto-Lei nº 363/2007, com o intuito de impulsionar o desenvolvimento das instalações de sistemas de microprodução e com a finalidade de simplificar o regime à microprodução de eletricidade, existindo a partir desse momento dois regimes de remuneração: o geral e o bonificado. Este decreto-lei sofreu algumas alterações ao longo dos últimos anos, tendo sido publicado em 20 de Outubro de 2014 um novo enquadramento legislativo para o autoconsumo e pequena produção distribuída através do Decreto-Lei nº 153/2014, que estabelece enquadramento legal único para a produção de eletricidade destinada ao autoconsumo através das Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) e a produção de eletricidade destinada para venda à rede elétrica de serviço público a partir de recursos renováveis através de Unidades de Pequena Produção (UPP) [6].

A motivação para a realização deste trabalho surge da adesão por parte do município de Torres Vedras ao “Pacto dos Autarcas”, com o objetivo de proporcionar ao município informações válidas e vantajosas que terão impacto no cumprimento dos objetivos propostos pelo município na adesão ao “Pacto dos Autarcas”.

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se identificar o potencial energético renovável – Solar e Eólico - na cidade de Torres Vedras, para a possível integração e aproveitamento de energias renováveis nos edifícios públicos propostos pela Câmara Municipal de Torres Vedras, mais concretamente o edifício Multisserviços e Centro de Educação Ambiental.

Será realizada uma análise energética ao nível da estimativa de produção energia elétrica de origem renovável a serem implementados nos edifícios propostos pelo município, para possível instalação de uma UPAC ou UPP. No caso de uma UPAC, identificar o perfil de consumo energético dos edifícios municipais analisados, qual o impacto energético que este sistema terá na redução das necessidades da Rede Elétrica de Serviço Público (RESP) do edifício em análise, do possível excedente de produção de energia elétrica proveniente das tecnologias renováveis e determinar a capacidade de o edifício produzir a sua própria energia elétrica para o seu normal funcionamento

A análise ao nível económico da UPAC passará pela estimativa de custos que são evitados entre o município e a operadora de energia elétrica ao longo do tempo de vida de cada instalação e no caso de ocorrer a situação de produção de excedente de energia elétrica, qual o montante recebido pelo município de Torres Vedras. Já para a UPP será analisado a receita esperada pela venda da totalidade da energia elétrica à RESP. Para ambos os casos serão tidos em conta a estimativa dos custos associado à aquisição dos equipamentos necessário para a produção de energia elétrica de origem renovável e de operação e manutenção (O&M) de cada instalação.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho é constituído por 5 capítulos, sendo que o primeiro capítulo será referente à motivação e aos objetivos propostos a alcançar para o mesmo.

O segundo capítulo passa inicialmente, pelo enquadramento dos conceitos de cidade sustentável e de cidade inteligente. Posteriormente, será efetuado duas análises, uma à cidade de Torres Vedras e outra à aplicação de tecnologias renováveis em ambiente urbano, através do estado da arte das tecnologias e dos modelos para determinação dos recursos renováveis em ambiente urbano. Por fim, será efetuado um enquadramento do Decreto-Lei n.º 153/2014, legislação em vigor com a finalidade de incentivar a produção e consumo de energia renovável.

No terceiro capítulo será abordado a metodologia aplicada para a obtenção do recurso solar e eólico, da estimativa de produção de energia elétrica dos equipamentos de energia renovável e da análise energética e económica.

No quarto capítulo será efetuado o tratamento dos dados e apresentação dos resultados obtidos e a sua respetiva análise. Finalmente, o quinto e último capítulo apresenta as conclusões, as limitações e propostas de desenvolvimento num futuro próximo.

2. Desafios energéticos em meios urbanos

Neste capítulo serão abordados e desenvolvidos os temas de enquadramento do trabalho a realizar. Desde logo, os conceitos de cidades inteligentes e sustentáveis, a diferença entre ambos os conceitos e o caminho a tomar para a sua implementação. Será caracterizado a área urbana em análise, mais concretamente a cidade de Torres Vedras, e os edifícios propostos pela C. M. de Torres Vedras. Serão ainda abordados os aspetos mais importantes dos dois recursos renováveis a serem estudados neste trabalho - recurso solar e eólico - em particular, o estado de desenvolvimento de cada tipo de tecnologia e os métodos mais adequados à avaliação do potencial energético dos recursos em questão em ambientes urbanos e construídos. Por fim, será efetuado o enquadramento legal do Decreto-Lei n.º 153/2014, que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de eletricidade destinada para o autoconsumo ou venda da sua totalidade à RESP.

2.1 Cidades sustentáveis e cidades inteligentes

As zonas urbanas são responsáveis por cerca de 80 % das emissões dos Gases de Efeito de Estufa (GEE), o que terá influência na sua vulnerabilidade aos efeitos das alterações climáticas e a fenómenos extremos meteorológicos [3] [5]. Ao mesmo tempo, espera-se que existam reduções na ordem de 50 a 60 % das emissões dos GEE em 2050 para mitigar a ameaça das alterações climáticas [7].

Com a necessidade de olhar e viver num centro urbano, foi criado o conceito de “cidade sustentável” com o intuito de os centros urbanos terem a capacidade de integrar toda a população existente no futuro e garantir uma vida sustentável nesses centros urbanos.

Um dos conceitos de “cidades sustentáveis” corresponde à capacidade de desenvolver uma respeitosa coordenação entre a economia, a ecologia e a igualdade [8]. Outro conceito frequente referido na literatura é a capacidade de satisfazer as necessidades próprias do momento sem colocar em perigo as necessidades próprias de futuras gerações. A base do conceito de desenvolvimento sustentável tem como objetivos [9]:

- melhorar a qualidade de vida – objetivo do desenvolvimento;
- viver de acordo com os limites do meio ambiente – objetivo da sustentabilidade;
- investir no progresso tecnológico;

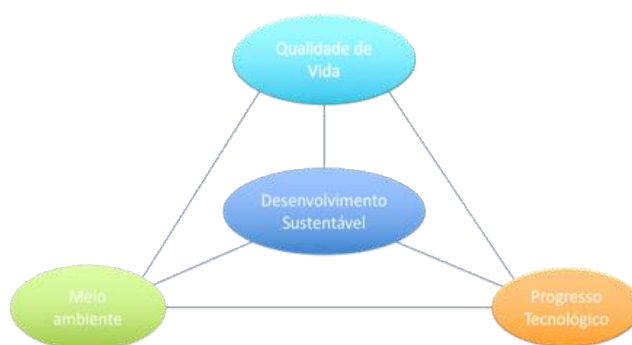


Figura 2.1 - Principais conceitos para a base do desenvolvimento sustentável [9].

Para um menor consumo dos recursos, existe a necessidade de investir no progresso tecnológico e assim, melhorar a qualidade de vida das populações. Pode-se então dizer que o conceito “cidades sustentáveis” e “cidades inteligentes” estão interligados, uma vez que têm o mesmo objetivo ao nível

tecnológico. Neste sentido, a aplicação destes dois conceitos pode resultar, de acordo com alguns autores, numa “cidade inteligente e sustentável” [9][10].

O conceito de cidade inteligente é amplamente utilizado. A União Europeia (UE) entende que através da aplicação de diversas tecnologias inteligentes nas áreas da mobilidade, economia, ambiente e social é possível alcançar a sustentabilidade nas cidades. O conceito de cidades inteligentes teve uma maior relevância na última década na Europa, devido às políticas energéticas e climáticas que a UE definiu até ao ano de 2020. Como exemplo, o *SETPlan – The European Strategic Energy Technology Plan* – é um projeto financiado pela UE, com o intuito de incentivar e monitorizar a política energética definida por todos os estados-membros [10][11].

Ao nível nacional diversas cidades portuguesas já aderiram ao Pacto do Autarcas, onde os municípios se comprometem a reduzir as emissões de GEE até 2020 (Lisboa, Porto entre outros). Outro projeto implementado em Portugal é o *Inovcity* que passa pela adesão às redes elétricas inteligentes promovendo a eficiência energética, a penetração de energias renováveis e a mobilidade elétrica na cidade de Évora [12].

De acordo com os cenários recentes, as novas tecnologias energéticas como as energias renováveis e as medidas de eficiência energética, podem desempenhar um papel central nos desafios energéticos e climáticos [7]. Como tal, é necessário criar e aplicar estratégias para que os sistemas energéticos nas cidades sejam resilientes às ameaças naturais e às criadas pelo Homem, tendo como objetivo o benefício ao nível de diversos setores importantes que existem nos centros urbanos, como por exemplo ao nível ambiental, através da diminuição das emissões dos GEE, e ao nível social através do bem-estar e da felicidade dos habitantes [5].

2.2 Cidade de Torres Vedras e edifícios municipais

A cidade de Torres Vedras pertence ao distrito de Lisboa, região Centro e sub-região Oeste (NUTS III). A zona urbana da cidade encontra-se a cerca de 15 km do Oceano Atlântico, com altitudes que variam entre 25 e 103 metros em relação ao nível médio do mar. Está rodeada a Este, a Sul e a Oeste por pequenas montanhas (Serra da Capucha e das Marvas), estando assim inserida num vale criado por estas.

A zona urbana de Torres Vedras tem uma boa exposição solar, exceto na zona histórica da cidade (Castelo) e na zona Este (influenciada pela Serra das Marvas), zonas onde se poderá verificar uma maior variação da distribuição da radiação solar provocada pela densidade de edifícios existentes, pelo declive, orientação e altitude do terreno.

Está implementado no município de Torres Vedras diversos parques eólicos (e.g. Parque eólico da Serra da Capucha ou da Serra da Archeira) e, tendo em conta a envolvente geográfica descrita anteriormente, pode haver condições para o aproveitamento do recurso eólico em meio urbano.

Os edifícios propostos pela C. M. de Torres Vedras para a realização da presente dissertação são (Figura 2.2):

- Multisserviços da C. M. de Torres Vedras
- Centro de Educação Ambiental de Torres Vedras;

O edifício Multisserviços da C. M. de Torres Vedras está localizado na Av. 5 de Outubro, em plena zona urbana da cidade. É um edifício que alberga diversos serviços camarários e balcões de atendimento aos munícipes. É caracterizado por não ter nenhum sistema de energia renovável

implementado, dando assim possibilidade para a realização deste trabalho, de efetuar análises energéticas e económicas às instalações do tipo Unidades Pequenas de Produção (UPP) e Unidade para Autoconsumo (UPAC).



Figura 2.2 - Edifício Multisserviços da C. M. de Torres Vedras e Centro de Educação Ambiental. Informação acerca das coberturas dos edifícios e suas envolventes.

A cobertura do edifício tem uma orientação azimutal de 154° Este e as suas inclinações são de 18° e 27°. As envolventes do edifício referido é caracterizada pela existência de um edifício de altura considerável a Oeste, de edifícios escolares a Sul, sendo nas restantes orientações restringido por prédios urbanos para fins habitacionais e de comércio.

O Centro de Educação Ambiental (CEA) de Torres Vedras foi inaugurado no ano de 2013, está localizado no Parque Verde da Várzea e foi projetado de forma a produzir o mínimo impacto ambiental e paisagístico. Este edifício tem como objetivo fomentar a cooperação entre entidades públicas e privadas, promoção de projetos escolar e permitir acesso à informação e participação da comunidade local. O edifício é caracterizado por ter uma cobertura verde com possibilidade de acesso pedonal e zonas restritas. Devido à sua localização, o edifício é rodeado, na sua grande maioria, por pequena vegetação, exceto na zona Este, onde se encontra um local com poucas árvores.

Neste edifício está implemento um sistema híbrido em regime jurídico da microprodução com 11 módulos solares fotovoltaico e uma microturbina eólica para microprodução (Figura 2.3).



Figura 2.3-Sistema solar fotovoltaico e microturbina eólica da instalação de microprodução instalado no Centro de Educação Ambiental de Torre Vedras.

No levantamento realizado foi identificado a microturbina eólica da marca Proven, com uma potência nominal de 2,5 kW e um inversor eólico da marca SMA com uma eficiência de 93%.

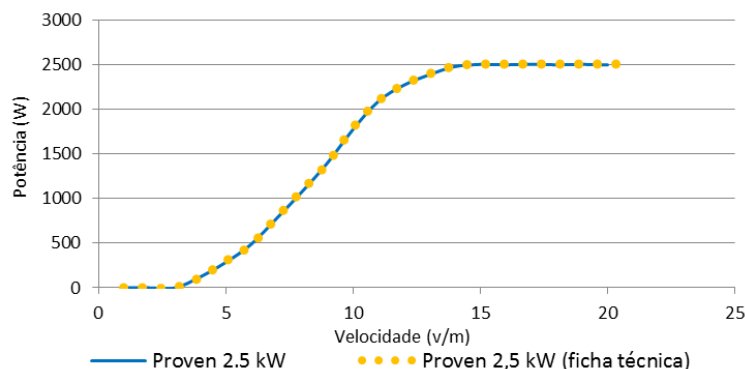


Figura 2.4 - Curva de potência da turbina Proven instalada no edifício Centro de Educação Ambiental. A linha tracejada corresponde aos valores retirados da ficha técnica da microturbina e a linha contínua aos valores aplicados no cálculo de produção de energia elétrica.

A tecnologia solar fotovoltaica instalada na cobertura do edifício CEA é da marca MPrime, do tipo policristalino, com uma potência ($P_{\text{mód.}}$) de 240 W_p, o que perfaz uma potência total de instalada 2,64 kW_p, com uma eficiência (η) de 14,9% e estão ligados a um inversor solar da marca SMA com uma eficiência de 93,2%. Os módulos têm uma orientação de 166° Este, inclinação de 39° e com o espaçamento entre as fileiras valor máximo do comprimento da sombra que é provocada pelos módulos.

Tabela 2.1 - Características técnicas do módulo solar instalado no sistema Microprodução do Centro Educação Ambiental de Torres Vedras

Tecnologia	η [%]	$P_{\text{mód.}}$ [W _p]
Policristalino - Microprodução	14,9	240

2.3 Energias renováveis em meio urbano

Os centros urbanos são responsáveis pelo consumo de 75 % da energia produzida mundialmente, devido às necessidades de climatização ou de transporte por parte da população, por exemplo [5].

A integração de sistemas de produção descentralizada de energia elétrica nos centros urbanos, através de fontes de energia renovável, têm como vantagens ser uma solução para a redução das emissões dos GEE, na criação de independência energética, de uma maior segurança da rede, na redução de investimento na modernização da rede elétrica e da coesão social [5][7].

A produção de energia elétrica, proveniente de sistemas de energia renovável, é complexa em meio urbano, tendo inúmeros desafios devido às limitações de espaço, à orientação dos edifícios, à emissão de ruído (no caso da energia eólica), ao impacto visual nos edifícios devido à integração destas tecnologias e restrições de planeamento [13]. Ao nível técnico, a utilização em grande escala de fontes de energia renovável variáveis no tempo e no espaço, traz novos desafios técnicos, devido à necessidade de equilibrar a produção e o consumo de energia elétrica.

2.3.1 Recurso eólico em meio urbano

- **Camada limite urbana**

A Camada Limite Urbana (CLU) difere em relação à Camada Limite Atmosférica devido à complexidade da superfície terrestre numa área urbana, sendo essa fortemente influenciada pela variação da forma e cota dos edifícios existentes e das ruas, entre outros elementos existentes.

A CLU pode ser dividida em diferentes subcamadas, das quais é exemplo a subcamada de rugosidade urbana, que pode ir de 2 a 5 vezes a altura média dos edifícios existentes. É nesta subcamada que existe interferência das superfícies rugosas no escoamento, originando um escoamento horizontal heterogéneo que é influenciado pela altura, largura e distância dos elementos de rugosidade [11] [14].

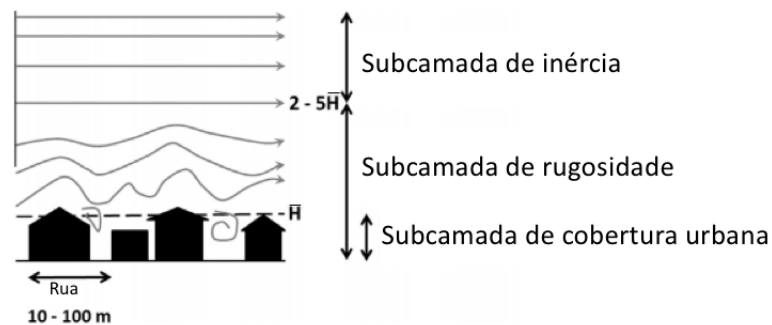


Figura 2.5 - Esquematização das subcamadas de inércia, de rugosidade e da cobertura urbana. A linha tracejada é a altura média dos edifícios e nas linhas contínuas o comportamento do fluxo nas camadas [14].

A subcamada de cobertura urbana corresponde à zona inferior da altura média dos edifícios existentes. Nesta subcamada o escoamento é diretamente afetado pelos obstáculos existentes no local e pela rugosidade individual destes, contribuindo assim para um escoamento fortemente heterogéneo. Devido ao estudo nas áreas da dispersão de poluentes, da avaliação do vento para conforto pedestre e no aproveitamento da energia eólica em meio urbano, o conhecimento das características do escoamento nesta zona é relevante.

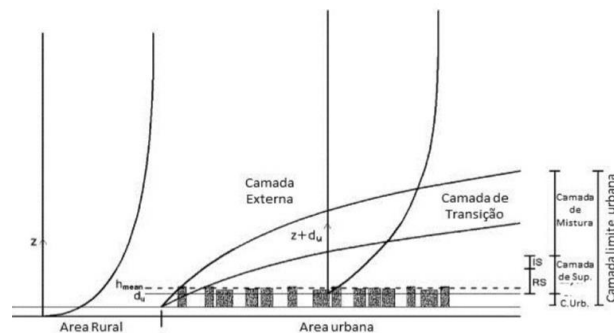


Figura 2.6 - Perfil da camada limite urbana [11].

Na subcamada de inércia ocorre a adaptação ao efeito provocado pela subcamada de rugosidade. Na parte superior desta subcamada existe a camada de mistura, que tem como características perfis horizontalmente homogéneos e verticalmente uniformes que resulta de uma rápida mistura do escoamento e da temperatura [11].

O estudo do comportamento do vento para uma dada altura pode ser efetuado a partir da subcamada de inércia. Esta possibilidade surge devido à velocidade horizontal do vento para uma dada altura ($u(z)$) obedecer à Lei Logarítmica de Prandtl:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left[\frac{z-d}{z_0} \right] \quad (2.1)$$

Onde u_* corresponde à velocidade de fricção ou de atrito, κ tem um valor de 0,4 sendo conhecida como a constante de Von Karman, os parâmetros aerodinâmicos d e z_0 correspondem, respetivamente, à altura de deslocamento e comprimento de rugosidade, e z a altura acima do solo.

O valor de d pode ser determinado a partir da equação 2.2, sendo H a altura do edifício.

$$d = H - \frac{z_0}{\kappa} \quad (2.2)$$

Para a determinação de uma estimativa mais precisa da velocidade do vento em meio urbano é importante ter o conhecimento da altura e distância entre os edifícios, obtendo assim valores mais precisos dos parâmetros aerodinâmicos z_0 e d que correspondem á realidade do local em estudo. Nos casos de não existir a possibilidade de efetuar um levantamento dos edifícios/elementos que estão localizados em meio urbano, uma alternativa é o uso de valores elevados de rugosidade. A Tabela 2.2 apresenta valores de comprimento de rugosidade para diferentes tipos de terreno.

Tabela 2.2- Valores de comprimento de rugosidade para diferentes tipos de terreno [11].

Tipo de terreno	Comprimento da rugosidade, z_0 (m)
Muito liso, gelo ou lama	$0,01 \times 10^{-3}$
Campo de neve	$0,03 \times 10^{-1}$
Pasto rugoso	0,01
Culturas	0,05
Muitas árvores, poucos edifícios	0,25
Subúrbios	2,50
Centro da cidade com edifícios altos	3,00

Outra aproximação decorrente da Lei Logarítmica de Prandtl e que pode ser igualmente usada na determinação da velocidade do vento é a Lei de Potências.

$$u(z) = u(z_{Ref}) \left(\frac{z}{z_{Ref}} \right)^\alpha \quad (2.3)$$

Esta aplica-se nos casos em que se conhecem os valores de referência da velocidade do vento para uma determinada altura acima do solo, permitindo calcular a velocidade média do vento para uma determinada cota desconhecida, onde α é um expoente que depende da rugosidade do terreno (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Valores de α conforme o tipo de terreno em estudo [15].

Tipo de terreno	α
Campo com erva e poucas árvores	0,16
Muitas árvores e alguns edifícios	0,22 – 0,24
Floresta, pequenas vilas e subúrbios	0,28 – 0,30
Áreas urbanas com edifícios altos	0,40

Através da discretização das subcamadas da CLU é possível constatar que o comportamento do vento em ambiente urbano é deveras complexo. O escoamento atmosférico é fortemente afetado por obstáculos físicos (e.g. edifícios), pela rugosidade (e.g. vegetação), ao nível térmico (e.g. ar condicionado, efeito de ilha de calor urbana), da topografia natural (e.g. humidade) e turbulência (e.g. edifícios altos) [16].

Os elementos existentes em meio urbano (e.g. edifícios, vegetação etc.) exercem influência no escoamento devido às forças de atrito. Essa força tem como particularidade direção e sentidos opostos ao escoamento, tendo assim importância na redução da velocidade do escoamento.

Os desfiladeiros urbanos podem ser caracterizados como uma área edificada de forma regular, com alturas distintas, podendo os edifícios estarem agrupados em blocos ou intersectados por ruas. Os desfiladeiros urbanos podem originar aceleração da velocidade do vento ou alteração do regime deste, devido aos “canais” formados pelo edificado. A classificação e caracterização do tipo de desfiladeiro pode ser consultada no Anexo A.

• Potencial eólico

São aplicados modelos estatísticos para caracterização do regime de vento com o intuito de permitir estimar a frequência de ocorrência de uma determinada velocidade do vento, sendo a função de distribuição de Weibull normalmente a mais adequada a aplicações eólicas. A função de densidade de probabilidade de Weibull exprime-se matematicamente da através da seguinte equação:

$$f(\bar{u}) = \frac{k}{A} \left(\frac{\bar{u}}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\bar{u}}{A}\right)^k\right) \quad (2.4)$$

Onde $f(\bar{u})$ é a frequência de ocorrência da velocidade média do vento, A é o parâmetro de escala da distribuição de Weibull e k é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull.

A equação 2.5 representa a função de probabilidade acumulada de Weibull [17].

$$F(\bar{u}) = \exp\left(-\left(\frac{\bar{u}}{A}\right)^k\right) \quad (2.5)$$

Ao se ter conhecimento dos parâmetros A e k é possível conhecer a distribuição de Weibull. O valor de k vai influenciar a probabilidade de ocorrência da velocidade do vento - quanto maior o seu valor menor será a ocorrência de valores superiores de velocidade - assumindo valores diferentes consoante a morfologia do terreno e o regime de ventos naquela região. No caso de $k = 1$ a distribuição de Weibull transforma-se numa distribuição exponencial e para $k = 2$, na distribuição de Rayleigh. Já o valor de A está relacionado unicamente com a velocidade média [18].

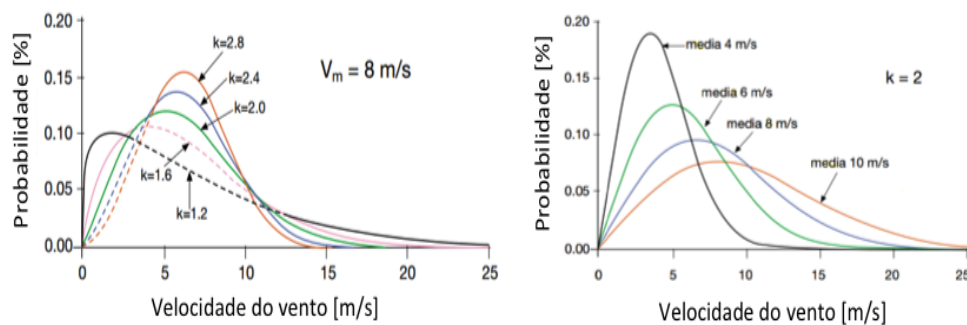


Figura 2.7 - Curva de Weibull para diferentes valores de parâmetros k e A [18].

A equação 2.6 permite determinar a potência disponível no vento (P_{disp}) para uma determinada área da turbina eólica (A_t), sendo proporcional ao cubo da velocidade do vento.

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho A_t u^3 \quad (2.6)$$

A totalidade de P_{disp} não pode ser convertida em potência mecânica no veio da turbina, uma vez que o ar, depois de atravessar o plano das pás, tem de sair com velocidade não nula devido a imperfeições mecânicas. O coeficiente de potência (C_P) corresponde ao quociente entre a potência mecânica disponível no veio da turbina (P_{mec}) e a potência disponível no vento.

$$C_P = \frac{P_{mec}}{P_{disp}} \quad (2.7)$$

Para a estimativa da produção anual de energia elétrica é necessário obter informação acerca da curva de potência de uma turbina. A estimativa da produção de energia elétrica ($E_{eól}$) para um determinado período de tempo (t) num determinado local é efetuada através da integração do produto entre a função de distribuição do vento $f(u)$, pela curva de potência de uma turbina eólica (P_{mec}).

$$E_{eól} = t \int_0^{\infty} f(u) \cdot P_{mec}(u) \cdot du \quad (2.8)$$

No caso de aplicar a distribuição de Weibull, fica [17]:

$$E_{eól} = t \int_0^{\infty} \frac{k}{A} \left(\frac{\bar{u}}{A} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{\bar{u}}{A} \right)^k \right) \cdot P_{mec}(u) \cdot du \quad (2.9)$$

• Modelos de Dinâmica Computacional de Fluidos – CFD

A comunidade científica tem realizado diversos estudos em áreas urbanas ao nível do comportamento do escoamento atmosférico em ambiente urbano nas áreas da meteorologia, da ventilação natural, dispersão de poluentes e do aproveitamento energético[19] [20].

Apesar da evolução tecnológica que tem existido, a caracterização do potencial eólico urbano é de enorme complexidade devido à presença de obstáculos naturais e construídos pelo Homem. A presença destes vai provocar alteração do comportamento do vento, tais como separação do escoamento, redução da velocidade e aumento da turbulência em redor dos obstáculos.

Os modelos CFD constituem, na atualidade, o estado de arte para o estudo do vento nas cidades. Todavia, a aplicação dos modelos de CFD está associado a elevados custos computacionais, desde logo a necessidade de computadores de elevada capacidade de processamento em áreas de elevada complexidade de geometria, devido ao considerável número de pontos que constituem a malha do domínio para grandes áreas. Outro dos problemas dos modelos CFD está relacionado com a escolha inapropriada dos valores a introduzir nas condições iniciais, de fronteira do domínio e problemas de convergência que são motivados pela complexidade do problema ao nível da malha do domínio. A validação dos resultados obtidos nos modelos de CFD, pode ser através de ensaios de túnel de vento e/ou do registo dos valores da velocidade de vento nas campanhas experimentais realizadas *in situ*.

Os modelos CFD tem a capacidade de resolver as equações de Navier-Stokes para o escoamento médio – RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) – com recurso a modelos de turbulência como fecho das equações. Os modelos de turbulência mais aplicados são do tipo $k - \varepsilon$ e $k - \omega$, sendo que existem diversos autores que referem a aplicação do modelo $k - \omega$ como o mais adequado para a caracterização do potencial eólico em meio urbano, tal deve-se porque o modelo $k - \varepsilon$ tende a sobrestimar a viscosidade turbulenta em situações de separação do escoamento [11].

Nos últimos anos tem sido realizado diversos estudos com modelos CFD com o intuito de identificar o potencial eólico em meio urbano, como exemplo a nível nacional foi aplicado uma metodologia simples e pouco onerosa de avaliação do potencial eólico em ambiente urbano, mais concretamente na cidade de Torres Vedras (Figura 2.8) [11]. A nível internacional foi elaborado um mapa do potencial eólico da cidade de Barcelona através do recurso a um software *UrbaWind*, que teve em conta os efeitos da elevação e edifícios para uma área urbana de 640 km² [21].

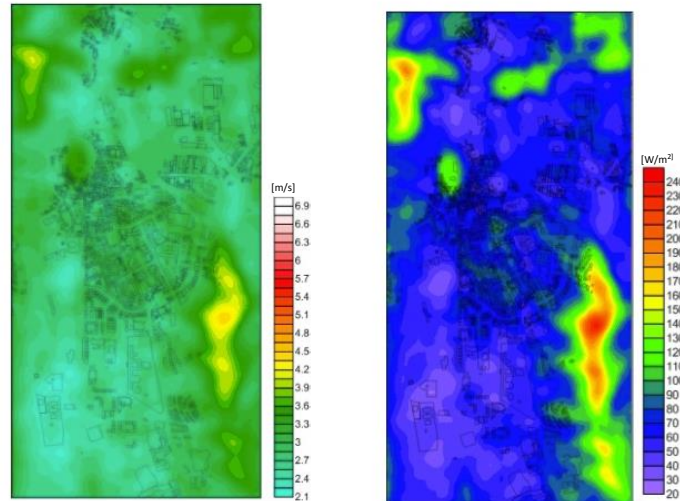


Figura 2.8 – Velocidade do vento (esquerda) e fluxo de potência incidente (direita) na cidade de Torres Vedras [11].

• Tecnologia eólica em meio urbano

A conjuntura económica que se verificou ao nível mundial e a alteração dos valores das tarifas *feed-in* aplicadas em diversos países no ano de 2012 influenciaram o decréscimo de potência anual instalada. A *World Wind Energy Association* (WWEA) estima que em todo o Mundo no final desse ano existia perto de um milhão de equipamentos, o que corresponde em termos de potência instalada perto de 948 MW e, numa perspetiva de futuro, prevê-se que até ao ano de 2020 esteja instalado cerca de 1,9 GW [22].

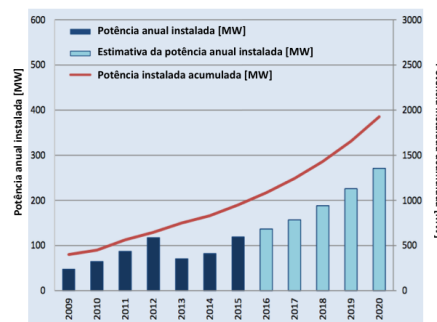


Figura 2.9 - Previsão e potência instalada ao nível do mercado mundial entre os anos de 2009-2020 [22].

O crescimento verificado deve-se ao desenvolvimento tecnológico ao nível da redução do ruído, do *design*, da possibilidade de integração arquitetónica e do uso eficiente do recurso eólico disponível. Os desenvolvimentos referidos resultam num aumento do desempenho de produção de energia elétrica, tornando assim a sua implementação mais rentável em termos financeiros, através da redução do custo por cada valor de potência instalado e do custo por cada valor de energia elétrica produzida. É essencial que os dois indicadores económicos referidos permaneçam com preços acessíveis, tornando

o investimento apelativo e atrativo neste tipo de tecnologia e tornando-se assim uma solução tecnológica mais fiável [23].

A produção de energia elétrica por parte das tecnologias eólicas em meio urbano é obtida através da utilização de turbinas eólicas de baixa potência nominal, denominadas de “microturbinas”. A Comissão Eletrotécnica Internacional - *International Electrotechnical Commission* (IEC) - estabelece na IEC 61400-2:2013 que as microturbinas devem de ter uma área de rotor inferior a 200 m², capacidade de gerar uma tensão máxima de 1000 V em corrente alternada ou 1500 V em corrente contínua [24]. Existe autores que definem as microturbinas através do diâmetro do rotor, que pode variar entre os 0,5 m a 20 m, e na capacidade de potência instalada que pode ir de 1,4 a 20 kW [25]. Estas podem ser classificadas consoante o seu eixo de rotação: se o eixo de rotação do rotor da turbina for horizontal é denominada por *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) e no caso do eixo de rotação for na vertical é considerada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT).

Na Tabela 2.4 é possível constatar as vantagens e desvantagens das microturbinas eólicas em ambiente urbano [26]:

Tabela 2.4 - Vantagens e desvantagem das microturbinas eólicas em ambiente urbano.

Vantagens	Desvantagens
Redução das perdas de transporte de energia elétrica.	Impossibilidade de existência de uma solução universal (coberturas diferentes).
Possibilidade de o ruído de funcionamento ser inferior ao ruído da cidade.	Transmissão de vibrações de funcionamento.
Possibilidade de não instalar torres.	Limite baixo de emissão ruído.
Possibilidade de aplicar em qualquer tipo de edifício.	Elevada turbulência e alterações rápidas de direção do vento.
Possibilidade de combinar com outro tipo de tecnologia de produção energia elétrica.	

No Anexo B é possível verificar os diversos tipos de modelos de microturbinas eólicas, quais as vantagens e desvantagens associadas a cada modelo de tecnologia e quais os desafios para um maior desenvolvimento deste tipo tecnologia.

2.3.2 Recurso solar em meio urbano

• Radiação Solar

A irradiância que incide num plano perpendicular à direção de propagação dos raios solares no topo da atmosfera denomina-se de “*constante solar*” (I_0), que corresponde ao valor médio anual de 1367 W/m². É assumido este valor médio uma vez que a distância entre a Terra e o Sol varia ao longo dos dias do ano (dia Juliano J) e influencia o valor de irradiância que chega ao topo da atmosfera (I):

$$I(t) = I_0 \left[1 + 0,0334 \cos \left(2\pi \frac{J - 3}{365,35} \right) \right] \quad (2.10)$$

Ao atravessar a atmosfera uma parte do valor da irradiância é refletida, absorvida (ozono, vapor de água, oxigénio) e dispersada (partículas de pó, poluição), desse valor de irradiância chega à superfície da Terra cerca de 1000 W/m² ao meio dia, em boas condições climatéricas e independentemente da

localização [27]. A radiação solar incidente numa superfície do planeta Terra é denominada por radiação solar global e resulta do somatório das seguintes componentes:

- **radiação direta** – É toda a radiação solar que percorre a totalidade da atmosfera sem sofrer alteração de direção, sendo assim proveniente diretamente do Sol.
- **radiação difusa** – É a radiação proveniente de todas as direções devido à alteração da sua direção, sendo essa alteração provocada por moléculas em suspensão na atmosfera, como nuvens, poeiras e nevoeiro.
- **radiação refletida** – Resulta da radiação que é refletida pelo solo que tem origem na reflexão da radiação incidente na superfície.

Ao nível da escala global, o movimento de translação e de rotação da Terra têm influência na distribuição da radiação, enquanto numa escala mais regional ou local o terreno através da sua variabilidade, altitude, declive e orientação é o que cria maior variação local da radiação global [11].

• Movimento Terra-Sol

O movimento de translação da Terra descreve uma trajetória eclíptica num plano de inclinação do eixo de rotação, provocando variações sazonais como o solstício de Verão e de Inverno e os equinócios de Outono e Primavera. Essa variação é designada por declinação solar (δ), que corresponde ao ângulo entre o equador terrestre e a direção Terra-Sol.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + J}{365}\right) \quad (2.11)$$

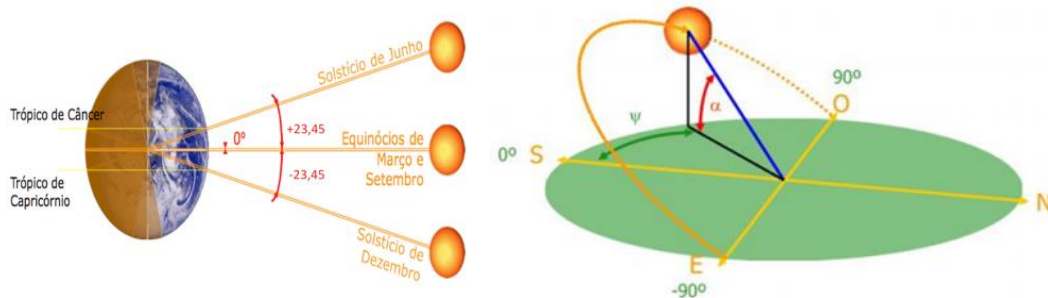


Figura 2.10 – Imagens representativas da declinação solar, do azimute e altura solar [28].

O posicionamento do Sol sobre o horizonte é determinado a partir das equações 2.12 e 2.13 para a altitude solar local (α_s) e o azimute solar (Ψ_s), respetivamente. Estas dependem da declinação solar, da latitude do local (ϕ) e da hora solar (ω_s).

$$\sin \alpha_s = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega_s \quad (2.12)$$

$$\cos \Psi_s = \frac{\sin \alpha_s \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha_s \cos \phi} \quad (2.13)$$

O valor ω_s é determinado pela equação 2.14 que depende do tempo em horas (H_s). Quando o valor ω_s é nulo corresponde ao meio dia solar, tendo valores negativos antes do meio-dia e positivos depois deste [28].

$$\omega_s = 15 \cdot (H_s - 12) \quad (2.14)$$

- **Modelação do recurso Solar**

O estudo do potencial solar em ambiente urbano tem tido uma enorme relevância devido ao recurso existente e à capacidade de integração nas zonas urbanas dos sistemas solares. Da mesma forma, a evolução tecnológica significativa e a crescente procura deste tipo de equipamentos implicaram, nos últimos anos, um decréscimo significativo nos custos dos sistemas fotovoltaicos, contribuindo assim para um acréscimo expressivo na instalação destes sistemas em Portugal.

Uma das possibilidades na identificação do recurso solar são os modelos solares existentes em plataformas *online*, sendo utilizados quer ao nível profissional e académico, devido à facilidade de acesso e à obtenção de resultados satisfatórios. O *Photovoltaic Geographical Information Systems* (PVGIS) do *Joint Research Center* da Comissão Europeia é provavelmente um dos modelos mais conhecidos deste tipo, que tem como base teórica o modelo solar *r.sun*. A sua capacidade de resolução espacial é de 1 km, o que traduz precisão dos valores de radiação solar mensal incidente no local pretendido. Existe a possibilidade de obter a estimativa de produção de energia elétrica por parte de um equipamento fotovoltaico [29] [30].

Outra possibilidade de estimar o recurso solar numa dada área é através da integração de modelos solares em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) devido à possibilidade de modelação de áreas extensas, georreferenciadas e à rapidez na modelação. Um dos modelos mais conhecido em SIG e bastante utilizados pela comunidade académica e profissional, é o *Solar Analyst*. Este modelo solar foi criado e desenvolvido com o intuito de ser uma extensão ao programa *ArcView* da ESRI e, nos dias de hoje, está integrado na extensão *Spatial Analyst Tools* com a designação de *Solar Radiation*, na versão completa do *ArcInfo* da ERSI [11].

O *Solar Radiation* tem como principais vantagens a precisão dos cálculos através de algoritmos baseados em linguagem C++, a possibilidade de calcular para um determinado período específico (hora, diário, semanal ou mensal), interface intuitivo, hipótese de gerar dados de radiação solar versáteis e a possibilidade de introduzir parâmetros atmosféricos (e.g. transmissividade e proporção difusa). Uma das principais desvantagens deste modelo é o tempo de processamento dos cálculos, uma vez que a precisão e qualidade dos resultados está diretamente relacionada com a resolução adotada. Apesar disso, este modelo tem sido aplicado em diversos estudos para diferentes áreas e escalas de estudo [31]. Como exemplo, o estudo da estimativa da radiação solar em áreas com topografias complexas, mais concretamente em Espanha no Parque Natural da Serra Nevada [32], ou em ambientes urbanos, mais concretamente em Portugal (Figura 2.11) na cidade de Lisboa [33].

Outra possibilidade é a utilização de *softwares* de modelação 3D baseados em *plug-ins* CAD. As vantagens passam pela capacidade de detalhar o enquadramento do local em análise, de ter comandos intuitivos e a sua versatilidade em ambientes urbano e não-urbano. Como exemplo, tem-se o *plug-in Skelion* para o *Google SketchUp*, que tem a capacidade de estimar o valor de radiação solar incidente e, consequentemente, a produção de energia elétrica de um determinado sistema fotovoltaico, tendo como base de dados o PVGIS ou do PVWatts, dependendo da localização [34].

Existe a possibilidade ainda de efetuar a estimativa de produção dos equipamentos de tecnologia solar fotovoltaica e térmica através de ferramentas computacionais de simulação dinâmica. Como exemplo, o *software EnergyPlus* que foi criado na década de 80, pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, e é aplicado para as análises energéticas e térmicas nos edifícios. A este *software* foi adicionado componentes solares ativos para a realização dos cálculos de produção de energia elétrica e térmica [35].



Figura 2.11 – Potencial solar fotovoltaico numa zona residencial da cidade de Lisboa [33].

• Tecnologia Solar Fotovoltaica

Nos dias de hoje, existem diversos tipos de tecnologias fotovoltaicas no mercado mundial. Este tipo de tecnologia pode ser classificado consoante o tipo de matéria-prima aplicada e da maturidade da tecnologia fotovoltaica ao nível comercial.

A primeira geração corresponde a células produzidas a partir do silício cristalino do tipo monocristalino ou policristalino. A eficiência associada a estas células ronda os 18 a 21% para a monocristalino e 13 a 14% para as policristalino. Os principais custos associados à produção destas células está relacionado com a espessura do silício (200 a 250 μm) [36]. No final do ano de 2016, mais de 90% das células fotovoltaicas produzidas em todo mundo têm como base o silício cristalino, sendo que quase 70% desse valor corresponde à utilização de células silício policristalino. [37].

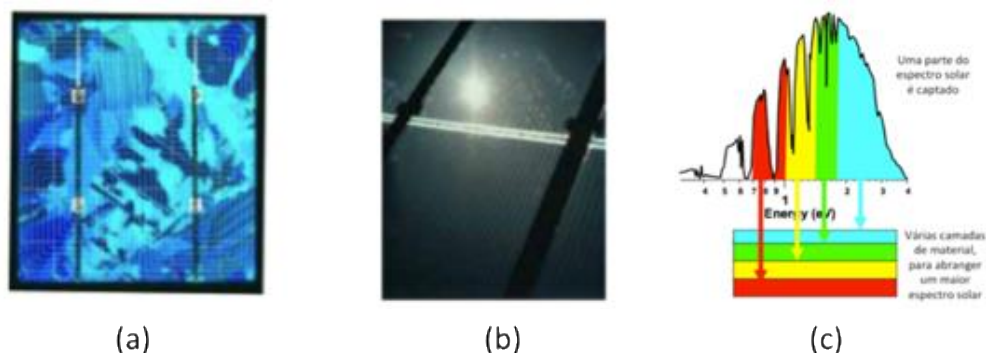


Figura 2.12 - Células fotovoltaicas, onde (a) corresponde à célula policristalina de 1ª geração e (b) módulos de película fina semitransparente de silício amorfo de 2ª geração [27] e (c) representação da constituição de uma célula multijunção e do espectro solar captado por cada um dos materiais (Adaptado de NREL CPV101).

A segunda geração está associada a soluções de película fina, como silício amorfo (a-Si), CIGS (cobre-índio-gálio-selénio) e telureto de gálio (CdTe). A utilização deste tipo de material tem como propósito a redução dos custos associados às células fotovoltaicas. Com este tipo de células é possível obter painéis solares mais versáteis, pois a película fina é depositada em substratos de baixo custo (vidro, plástico etc.), e tem uma maior eficiência de absorção de radiação solar, em comparação com as células de primeira geração. O custo associado a estas células é reduzido comparativamente à tecnologia de primeira geração e a eficiência ronda os 10% a 13%. Ao nível de produção mundial de módulos fotovoltaico de filme fino, estima-se que no final do ano de 2015 tenha sido produzido um total de 4,2 GW_p , o que corresponde a 6% do total de produção [27].

Baseado nas novas tecnologias solares, através da multijunção para aplicação em concentradores fotovoltaicos, nas células orgânicas e híbridas, surge a terceira geração de células fotovoltaicas. Estas

células fotovoltaicas têm um valor superior de eficiência comparativamente às gerações referidas anteriormente, a rondar os 32% para películas finas de tripla-junção GaInP/GaAs/Ge (fosfato de gálio-índio fósforo, arsenieto de gálio e germânio). Esta terceira geração é aplicada em equipamentos espaciais, embora para aplicações terrestres os custos associados a estas células sejam elevados. Este tipo de tecnologia está, maioritariamente, em fase de investigação e desenvolvimento com o intuito de diminuir os custos associados à sua produção [36].

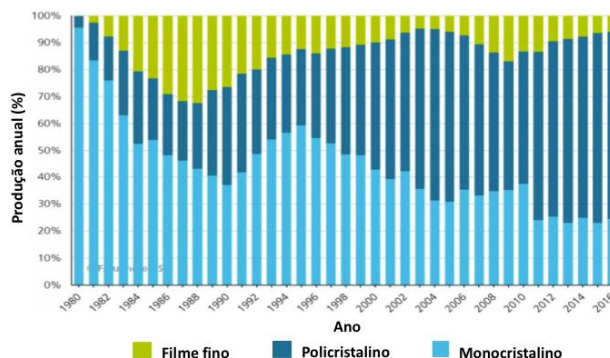


Figura 2.13 - Percentagem anual de produção mundial das diversas tecnologias solares fotovoltaicas [37]

No que respeita ao mercado mundial, verificou-se um crescimento na produção de tecnologias solares com base no silício nos últimos anos, sendo que no ano de 2015 esse valor correspondeu a 93% do total produzido a nível mundial. Dentro desta, foi registado um aumento de produção da tecnologia do tipo policristalino nos últimos anos, correspondendo em 2015 a uma quota de 69% da produção total a nível mundial [37].

2.4 Legislação para a produção descentralizada de energia elétrica

A produção descentralizada de energia elétrica em Portugal é atualmente regulamentada pelo Decreto-Lei n.º 153/2014 de 20 de outubro, que estabelece um enquadramento legal único para a produção de energia elétrica para Unidades de Produção para Autoconsumo (UPAC) e para as Unidades de Pequena Produção (UPP). A UPAC dá a possibilidade ao produtor de poder produzir a sua própria energia elétrica que será consumida na instalação associada à respetiva Unidade de Produção (UP), estando ou não ligado à Rede Elétrica de Serviço Público (RESP). A UPP possibilita a venda da totalidade de energia elétrica produzida pela UP à RESP, como acontecia na microprodução e miniprodução.

A UPAC e UPP são reguladas em comum ao nível dos direitos e deveres do produtor, ao controlo prévio e por normas específicas que acolhem as vicissitudes inerentes a cada atividade aplicada. As UP estão sujeitas a um registo prévio e a sua entrada em exploração está sujeita à obtenção de um certificado de exploração. As exceções a este controlo ocorrem nos seguintes casos:

- a UPAC com um valor superior a 1 MW de potência instalada requer para a sua instalação e exploração uma licença de produção e licença de exploração;
- a UPAC com um valor superior a 200 W e inferior ou igual a 1,5 kW ou cuja a instalação elétrica utilizada não se encontre ligada à RESP está sujeita apenas a uma mera comunicação prévia de exploração;
- a UPAC com um valor potência instalada inferior ou igual a 200W está isenta de controlo prévio.

O certificado de exploração é emitido ao titular do registo após a instalação da UP e verificação da sua conformidade, sendo que o registo da UP se torna definitivo com a emissão do certificado de exploração. O produtor singular ou coletivo deve cumprir os seguintes requisitos para proceder ao registo de uma UP:

- à data do pedido de registo, de uma instalação de utilização de energia elétrica, caso esta se encontre ligada à RESP, seja titular do contrato de fornecimento de energia elétrica com um comercializador de eletricidade;
- a potência de ligação (potência máxima ou, no caso de instalações com inversores, a potência nominal de saída deste equipamento, em kW ou kVA, que o produtor pode injetar na RESP) da UP seja menor ou igual a 100% da potência contratada do contrato estabelecido referido anteriormente;
- no caso da UPAC, a potência instalada não pode ser superior a duas vezes a potência de ligação;
- No caso da UPP, a energia elétrica consumida na respetiva instalação de utilização seja igual ou superior a 50% da energia elétrica produzida pela respetiva unidade, tendo como referência a relação entre a energia elétrica produzida e consumida no ano interior.

Se a instalação elétrica de utilização está conectada à RESP, deve ser efetuada por parte do promotor uma averiguação das condições técnicas de ligação no local onde pretende instalar a UP, com o intuito de verificar a existência de condições adequadas à receção de eventuais excedentes de eletricidade, salvaguardando os limites e condições técnicas estabelecidos no Regulamento da Qualidade de Serviço e no Regulamento Técnico e de Qualidade aprovado pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) [6].

Na Tabela 2.4 podem consultar-se os valores correspondentes à taxa de registo da unidade produtora, os quais se encontram publicados na Portaria n.º 14/2015 [38]. Existem, ainda nesta portaria, taxas referentes à reinspeção e de inspeção periódica que ocorrer de 10 em 10 anos na UP, que correspondem, respetivamente, a 30% e 20% do valor da taxa aplicável ao registo.

Tabela 2.5 - Taxa de registo da UP.

Potência instalada ($P_{inst.}$)	UP com injeção de potência na RESP	UP sem injeção de potência na RESP
$P_{inst.} < 1,5 \text{ kW}$	30 €	-
$1,5 \text{ kW} \leq P_{inst.} < 5 \text{ kW}$	100 €	70 €
$5 \text{ kW} \leq P_{inst.} < 100 \text{ kW}$	250 €	175 €
$100 \text{ kW} \leq P_{inst.} < 250 \text{ kW}$	500 €	300 €
$250 \text{ kW} \leq P_{inst.} < 1 \text{ MW}$	750 €	500 €

2.4.1 Unidades de Produção para Autoconsumo (UPAC)

A UPAC permite ao consumidor produzir a energia elétrica necessária às suas necessidades de consumo, correspondentes à instalação que está associada à respetiva UP. A produção da sua própria energia elétrica pode ter origem em tecnologias de origem renovável ou não renovável, e abranger as instalações de consumo de energia elétrica ligadas ou não à RESP.

Assim, as instalações UPAC estão limitadas ao nível da potência instalada, não podendo ser superior ao dobro da potência de ligação, enquanto a potência de ligação está limitada ao valor de potência contratada que foi estabelecido entre o produtor e o comercializador de eletricidade.

No caso de haver ligação à RESP e a potência instalada na UPAC não ser superior 1 MW, existe a possibilidade de o produtor estabelecer um contrato de venda do excedente de energia elétrica de origem renovável que foi produzido pela UPAC com um Comercializador de Último Recurso (CUR). A remuneração ao produtor tem em conta a compensação dos custos de injeção na RESP através da dedução de 10% do valor que será remunerado. A remuneração da eletricidade fornecida à RESP ($R_{RESP,m}$) é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$R_{RESP,m} = E_{fornecida,m} \cdot OMIE_m \cdot 0,9 \quad (2.15)$$

Onde $E_{fornecida,m}$ corresponde à energia elétrica não consumida e fornecida à RESP, o $OMIE_m$ é o valor da média aritmética simples dos preços de fecho do Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal (mercado diário), relativos ao mês “m”.

Existe ainda o pagamento de uma compensação mensal fixa por cada quilowatt (kW) instalado, nos primeiros 10 anos após a emissão do certificado de exploração, esta compensação é para UPAC cujo o valor de potência instalada é superior a 1,5 kW e que se encontram ligados à RESP. A compensação tem como objetivo a possibilidade de recuperar uma parcela dos custos decorrentes de medidas de política energética, de sustentabilidade ou de interesse económico geral na tarifa de uso global do sistema. O valor da compensação ($C_{UPAC,m}$) é calculado através da seguinte expressão:

$$C_{UPAC,m} = P_{UPAC} \cdot V_{CIEG,t} \cdot K_t \quad (2.16)$$

Onde P_{UPAC} é o valor de potência instalada na UPAC e que consta no respetivo certificado de exploração. $V_{CIEG,t}$ corresponde ao valor que permite recuperar os CIEG da respetiva UPAC, K_t o coeficiente de ponderação, entre 0% e 50% a aplicar ao $V_{CIEG,t}$ tendo em consideração a representatividade da potência total registada das UPAC no Sistema Elétrico Nacional e t o ano de emissão do certificado de exploração da respetiva UPAC.

O valor de K_t pode assumir os seguintes valores:

- $K_t=50\%$, caso o total acumulado de potência instalada das UPAC exceda os 3% do total da potência instalada de centro electroprodutores do Sistema Elétrico Nacional (SEN);
- $K_t=30\%$, caso o total acumulado de potência instalada das UPAC, se situe entre 1% e os 3% do total da potência instalada de centro electroprodutores do SEN;
- $K_t=0\%$, caso o total acumulado de potência instalada das UPAC, seja inferior a 1% do total da potência instalada de centro electroprodutores do SEN.

Existe ainda a possibilidade de o produtor não celebrar contratos de venda da eletricidade com o CUR, tendo como alternativa estabelecer relacionamento comercial para a venda a mercados organizados ou mediante contrato bilateral [6].

Através do 45º artigo do Decreto-Lei n.º 153/2014, os titulares de registos de microprodução e miniprodução têm a possibilidade de optar pelo seu enquadramento no regime jurídico da produção para autoconsumo previsto no presente decreto-lei, implicando a cessação definitiva do regime remuneratório de que o produtor está a beneficiar do regime jurídico da microprodução ou miniprodução [6],

2.4.2 Unidades de Pequena Produção (UPP)

A UPP destina-se exclusivamente à produção de eletricidade de origem renovável através de um só tipo de tecnologia de produção, onde a totalidade da energia elétrica produzida pela UPP é vendida à RESP. A UPP está limitada ao nível da potência de ligação, pois não pode ultrapassar o valor de potência contratada ao fornecedor de energia elétrica e tem um limite máximo de 250 kW de ligação à rede. Ao nível da produção de energia elétrica, numa base anual, a UPP não pode exceder o dobro da eletricidade consumida na instalação. Caso exista um excedente de produção, esta é injetada na rede sem ser remunerada para o produtor.

Para cada ano civil está atribuída uma quota máxima de potência de ligação de 20 MW, a alocar mediante despacho a publicar no Sistema Eletrónico de Registo da UPAC e UPP, no último dia de cada ano civil.

Ao nível remuneratório, a energia elétrica ativa produzida pela UPP e entregue à RESP é remunerada por uma tarifa atribuída com base num modelo de licitação, no qual os concorrentes oferecem descontos à tarifa de referência que é estabelecida mediante a portaria do membro do Governo responsável pela área da energia, até a 15 de dezembro de cada ano. Esta tarifa de remuneração está em vigor durante um período de 15 anos desde a data de início de fornecimento de energia elétrica à RESP.

O valor da tarifa de referência é atribuído consoante o tipo de categoria em que a UPP se encontra, sendo as categorias diferenciadas pelo tipo de tecnologias que poderão ser congregadas ou não à UPP [6]. A tarifa de referência para o ano de 2017 foi fixada pela Portaria n.º 20/2017 de 11 de janeiro, cujo os valores são:

- categoria I – 95 €/MWh, para instalação só com UPP;
- categoria II – 105 €/MWh, para instalação da UPP e pretensão do produtor de instalar no local de consumo associado à UPP uma tomada elétrica para carregamento dos veículos elétricos;
- categoria III – 100 €/MWh, para instalação da UPP e pretensão do produtor de instalar, no local de consumo associado à UPP, coletores solares térmicos com uma área útil mínima de 2 m² ou de caldeira a biomassa com produção anual de energia térmica equivalente.

Existe variação do valor da tarifa de referência e da quantidade eletricidade vendida à RESP consoante o tipo de energia primária a ser utilizada [39].

Tabela 2.6 - Variação do valor da tarifa de referência com a tecnologia de produção de energia elétrica a ser utilizada na UPP.

Energia Primária	Tarifa de Referência	Limite de venda eletricidade [MWh/ano]
Solar	100 %	2,60
Biomassa	90 %	5,00
Biogás	90 %	5,00
Eólica	70 %	2,60
Hídrica	60 %	5,00

3. Metodologia

Neste capítulo apresentam-se as metodologias aplicadas na determinação do recurso solar e eólico em ambiente urbano, na cidade de Torres Vedras, e o impacto da implementação de tecnologias de energia renovável nos edifícios sugeridos pela C. M de Torres Vedras, através da realização das análises energética e económica, de acordo com o Decreto-Lei n.º 153/2014.

Com o intuito de obter uma análise realística do recurso solar e eólico incidente na cidade de Torres Vedras e, principalmente dos edifícios propostos pelo município, os modelos digitais da cidade de Torres Vedras e dos edifícios são detalhados a partir das plantas de arquitetura e mapas topográficos disponibilizados pela C.M. Torres Vedras e pelo Centro de Informação Geoespacial do Exército (CIGeoE).

No caso da Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) é tido em consideração o perfil de carga dos edifícios, uma vez que é necessário considerar no dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos e híbridos uma igualdade nos valores de produção e consumo de energia elétrica, evitando assim um valor elevado de excedente de produção de energia elétrica. Relativamente à UPAC, assume-se que o fornecimento de eletricidade provém do Comercializador de Último Recurso (CUR), com o qual as unidades de produção também celebram um contrato de venda da eletricidade produzida e não consumida

Neste trabalho, tem-se em conta Unidades de Produção (UP), só com um tipo de tecnologia de energia renovável instalada para a Unidade de Pequena Produção (UPP), e para UPAC a análise passa pela implementação de uma UP com só um tipo de tecnologia de energia renovável ou um sistema híbrido.

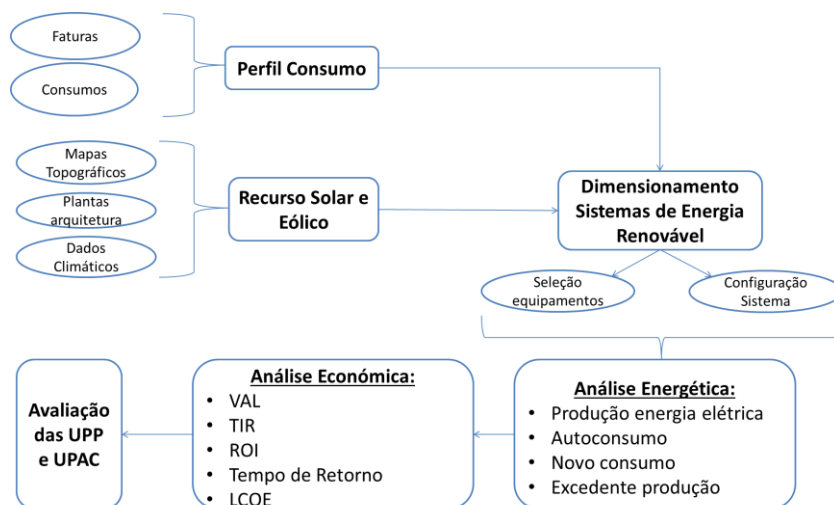


Figura 3.1 - Metodologia aplicada para a realização dos casos de estudo propostos.

3.1 Perfil de Consumo

A informação das faturas elétricas, referentes ao ano de 2016, disponibilizadas pela Câmara Municipal de Torres Vedras (CMTV), permitiu identificar a potência contratada, o tipo de tensão existente nos edifícios, o ciclo horário aplicado, o valor das tarifas de energia elétrica cobradas pela operadora e criar um perfil anual de consumo elétrico dos edifícios propostos para análise.

Com o intuito de obter um perfil energético horário dos edifícios sugeridos, foram recolhidos dados de perfis de consumo a aplicar em 2017 para instalações de média tensão (MT) e de baixa tensão especial (BTE) disponibilizados pela Entidade Reguladora de Serviços Energéticos (ERSE). A principal

caraterística dos dados da ERSE é a criação de um perfil de consumo de energia elétrica ativa das instalações dos clientes finais, conforme o tipo de tensão contratada. O perfil de consumo de energia elétrica é obtido através da seguinte equação [40]:

$$CDAE_{m,d,h} = \sum_1^n \frac{P_{m,d,h}}{\sum_m P_{m,d,h}} \cdot Consumo_m \quad (3.1)$$

Onde $CDAE_{m,d,h}$ corresponde ao consumo discriminado agregado estimado para o mês m , dia d e hora h , enquanto que $P_{m,d,h}$ é o perfil inicial publicado pela ERSE e $Consumo_m$ é o consumo real de energia elétrica ativa do mês homólogo do ano anterior.

3.2 Modelo digital da cidade de Torres Vedras e dos edifícios

Para construir os modelos digitais dos edifícios recorreu-se ao *software SketchUp*. Os modelos digitais dos edifícios são aplicados na análise do recurso eólico e na estimativa de produção de energia elétrica de origem solar. Para esta última, é necessário recorrer ao *plug-in Legacy OpenStudio*, que possibilita a criação e a visualização, em 3D, do edifício a ser utilizado no software de simulação, neste caso, *EnergyPlus*.

Com o mapa topográfico da cidade de Torres Vedras, foi possível criar o modelo digital da mesma com uma resolução de 1 metro, para o estudo do recurso solar incidente na zona urbana a ser executado no *ArcGIS*.

É de salientar que para a execução do modelo digital da cidade de Torres Vedras foi validada a existência dos edifícios da malha urbana na fonte de dados georreferenciados original, e adicionados os edifícios novos identificados com base no *software Google Earth*. Os edifícios novos identificados são caraterizados no modelo digital da cidade, com um “pé-direito” de três metros para cada piso.

A cobertura do edifício Multisserviços da C. M. de Torres Vedras foi caracterizado ao nível da inclinação e orientação no modelo digital para o estudo do recurso solar. Esta caraterização é possível devido à informação do valor da cota inferior e superior da cobertura nos projetos de arquitetura e pela aplicação de um método de interpolação entre as cotas referidas. Para tal recorreu-se à ferramenta *Natural Neighbor* do *software ArcGIS*.

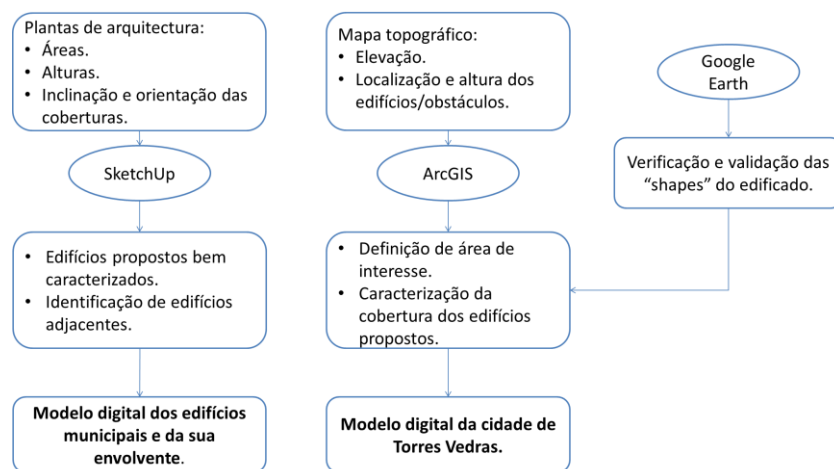


Figura 3.2 - Metodologia aplicada na recolha de informação para a criação dos modelos digitais da cidade de Torres Vedras, dos edifícios municipais e da sua envolvente urbana.

3.3 Potencial Solar

Para a determinação do recurso solar incidente na cidade de Torres Vedras é necessário percorrer diversas fases, como a definição da área de interesse, com o objetivo de centrar os cálculos nos valores de radiação solar a incidir nos edifícios e para reduzir o esforço computacional. Outro ponto importante é a caracterização da cobertura dos edifícios inseridos na área de interesse [41].

A determinação do mapa do potencial solar a partir da ferramenta *Solar Radiation* que se encontra integrada no *software ArcGIS*, permite ao utilizador a criação de mapas de recurso solar de uma determinada área geográfica e de um período de tempo específico, tendo em consideração os efeitos atmosféricos (transmissividade e proporção difusa), a variação temporal da posição do Sol, o efeito das sombras projetadas, a latitude, a elevação e orientação.

A ferramenta permite efetuar uma análise da radiação solar em pontos ou em áreas. No caso da análise da radiação solar para um ponto específico, tem em consideração a orientação da superfície e o céu visível, possibilitando assim obter resultados de elevada qualidade. Já no caso da análise da radiação solar de uma área específica, esta ferramenta, tem em conta a orientação, a inclinação das superfícies e o sombreamento originado por obstáculos existentes no modelo digital.

O *Solar Radiation* tem como base algorítmica o *Hemispherical Viewshed Algorithm*, que permite efetuar o cálculo da irradiação solar com base nas seguintes componentes (Figura 3.3):

- **Viewshed**- efetua para cada célula do modelo a distribuição angular da obstrução do céu existentes em cada direção. Esta distribuição é efetuada através de uma fotografia hemisférica, tirada de baixo para cima (*upward-looking*), semelhante à vista obtida através do olho de um peixe (*fisheye*)
- **Sunmap**- determina a quantidade de radiação solar direta proveniente de cada direção do céu, criando um mapa solar do hemisfério repartido em setores que representam os dias e os meses ao longo do ano.
- **Skymap**- tem em conta as componentes da radiação solar direta e difusa obtida para qualquer direção do céu. A sua base de construção depende dos valores definidos para o zénite e azimute, que define a divisão do céu em setores.

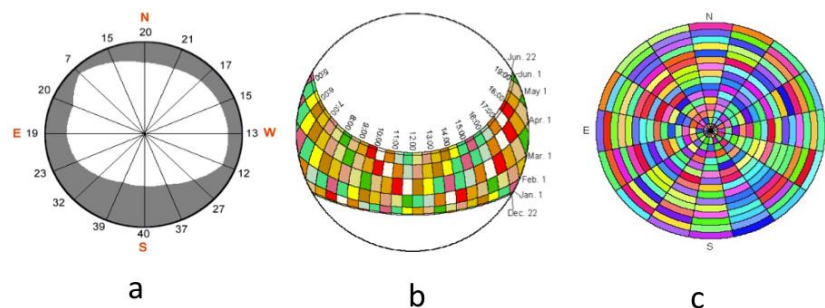


Figura 3.3- Componentes da radiação solar o Solar Analyst: a) Viewshed, b) Sunmap e c) Skymap [31].

A determinação do valor da radiação solar direta para cada sector resulta da sobreposição do *Viewshed* ao *Sunmap*, obtendo assim o de radiação solar de cada sector do *Sunmap* que não se encontra obstruído pelo *Viewshed*. A obtenção da radiação solar difusa resulta da sobreposição entre o *Viewshed* e o *Skymap*.

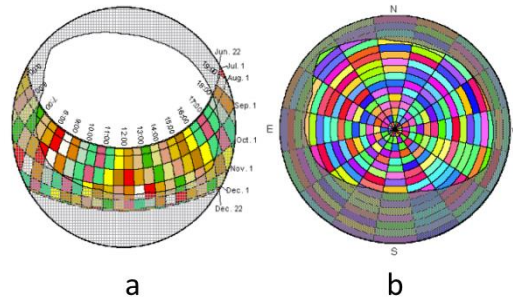


Figura 3.4 - Determinação das componentes da radiação solar direta através da sobreposição do Viewshed com o Sunmap (a) e da radiação difusa com a sobreposição do Viewshed com o Skymap (b) [31].

Os cálculos da radiação solar direta e difusa recorrem a um modelo simples de transmissão de radiação, recorrendo à constante solar, aos efeitos atmosféricos com base na transmissividade e proporção difusa, da fração de abertura, da posição do Sol, da atenuação atmosférica e da orientação da superfície. Para maior detalhe sobre este assunto, pode consultar-se o Anexo C deste documento.

No *Solar Radiation* foram mantidos os valores padrão para o *Z factor* e para o declive e exposições, assumindo assim que o declive e a exposição são calculados a partir da superfície matricial de entrada.

O modelo de radiação difusa, selecionado para a elaboração do mapa do potencial solar da cidade de Torres Vedras, foi o modelo *STANDARD_OVERCAST_SKY*. A seleção deste modelo tem como intuito a caracterização realista da radiação solar difusa, uma vez que o modelo faz o cálculo do fluxo da radiação solar difusa a partir da variação do valor de fluxo conforme o ângulo zenital, não tendo sempre o mesmo valor em todas as direções.

A determinação dos valores mensais a serem aplicados para a Proporção Difusa (P_{dif}) e Transmissividade (τ) resulta da análise mensal dos valores de radiação solar direta e radiação solar difusa obtidos no Climas-SCE. Sendo que a Proporção Difusa, tal como o nome indica, corresponde à proporção da radiação solar global que é radiação solar difusa.

$$P_{dif} = \frac{\text{Radiação Solar Difusa}}{\text{Radiação Solar Global}} \quad (3.2)$$

Os valores de transmissividade da atmosfera terrestre a serem aplicados correspondem ao quociente entre os valores de radiação solar global obtidos pelo Climas-SCE e do valor da radiação solar incidente no topo da atmosfera, calculado em função da relação entre a distância real e média do Sol-Terra, da latitude, da declinação solar e do ângulo solar (equação 2.12 e 2.14) [42].

$$\tau = \frac{\text{Radiação Solar Global}}{\text{Radiação Solar Topo Atmosfera}} \quad (3.3)$$

Para a definição dos parâmetros *Sky Size*, *Calculation directions*, *Zenith divisions* e *Azimuth divisions* a serem aplicados na ferramenta *Solar Radiation* do ArcGIS, é realizada uma análise ao nível do período de duração dos cálculos com a variação dos valores das variáveis referidas anteriormente. Os valores aplicados constam na Tabela 3.1 e os resultados obtidos podem ser consultados no Anexo D.

Tabela 3.1 - Valores dos parâmetros *Sky Size*, *Calculation directions*, *Zenith divisions* e *Azimuth divisions* a serem aplicados na ferramenta *Solar Radiation* do ArcGIS.

<i>Sky Size</i>	<i>Calculation directions</i>	<i>Zenith divisions</i>	<i>Azimuth divisions</i>
1200	72	180	90

São criados mapas mensais devido à variação dos valores de proporção difusa e transmissividade ao longo do ano. O mapa anual resulta da soma dos mapas mensais referentes à radiação solar global, da radiação solar direta e radiação solar difusa. O intuito de conceber os mapas da cidade com o potencial solar passa pela possibilidade de identificar e selecionar zonas de interesse para a instalação de sistemas de tecnologia solar na cidade de Torres Vedras.

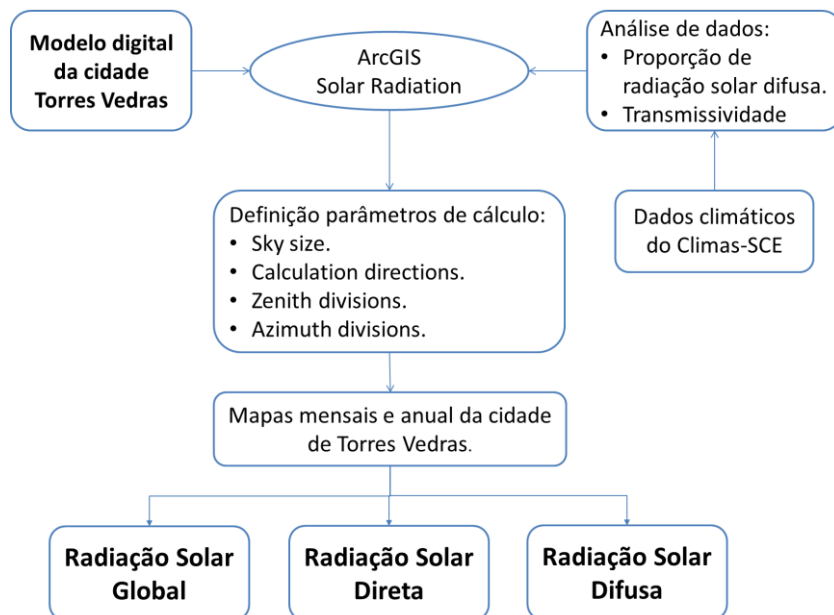


Figura 3.5 - Metodologia aplicada na determinação do potencial solar incidente na cidade de Torres Vedras [adap. 60].

A estimativa de produção de energia elétrica dos equipamentos de tecnologia solar fotovoltaica terá três níveis de estudo – determinação do potencial físico, geográfico e técnico [43].

O potencial físico está relacionado com a quantidade de energia primária disponível que é proveniente do Sol. Essa informação é proveniente do *Climas-SCE*, que disponibiliza informação dos valores de radiação solar global, radiação solar difusa e radiação solar direta normal ao nível local, de um ano meteorológico de referência, em formato .epw (*EnergyPlus Weather format*) [44].

O potencial geográfico consiste na análise dos possíveis locais a instalar o sistema solar fotovoltaico. A identificação destes locais, passa pela recolha de informação acerca da área útil disponível, da inclinação, da orientação e possíveis sombreamentos provocados por edifícios vizinhos.

A seleção dos equipamentos de tecnologia solar fotovoltaica e as características técnicas ao nível do tipo de ligação da instalação do sistema solar fotovoltaico estão inseridas no potencial técnico. Esta parte da metodologia é crucial e essencial pois influenciará os valores de produção de energia elétrica a ser produzidos pelos equipamentos de tecnologia solar fotovoltaica.

No presente trabalho são comparadas as tecnologias solares fotovoltaicas de primeira geração do tipo monocristalino e policristalino nos sistemas a serem instalados. Esta análise prende-se com o facto de esta ser uma das tecnologias mais instaladas no Mundo e com a elevada disponibilidade de informação, técnica e económica.

No processo de seleção do inversor recorreu-se à ferramenta online *Sunny Design Web*, que auxilia na seleção do inversor a ser instalado e na distribuição das *strings* por cada inversor, com o intuito de obter um valor de rendimento máximo de funcionamento deste. Foram identificados os inversores a considerar em cada sistema e se estes cumprem os requisitos definidos no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (Anexo E).

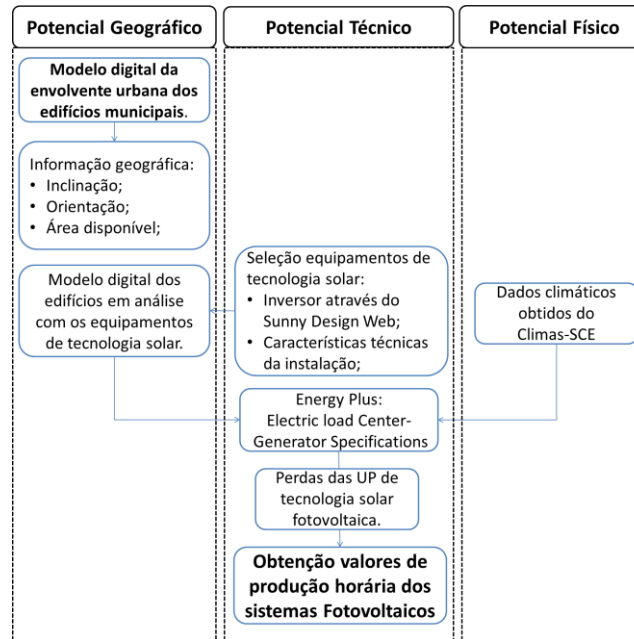


Figura 3.6 - Metodologia aplicada na determinação do valor de produção elétrica dos sistemas fotovoltaicos [adap. 62].

Os valores de produção de origem solar fotovoltaica são obtidos a partir do *EnergyPlus* 8.4.0. Para a obtenção dos mesmos, é necessário respeitar as diversas etapas de construção de um modelo, até à sua simulação dinâmica.

O *EnergyPlus* permite escolher três tipos modelos na determinação da energia elétrica produzida por estes, através do modelo “Simple”, “Equivalent One-Diode” e “Sandia”, sendo que todos partilham o mesmo modelo de radiação solar incidente (*Climate, Sky and Solar/Shading Calculations*).

O modelo aplicado na realização do trabalho foi o *Simple*, sendo este modelo simples na estimativa de produção de energia elétrica e interessante em fases iniciais, devido à rápida obtenção de informação dos valores de produção de energia elétrica, sem haver a necessidade de especificar o desempenho detalhado de um módulo fotovoltaico.

Neste modelo é necessário fornecer informação acerca da eficiência das células fotovoltaicas na conversão da radiação solar incidente em energia elétrica ($\eta_{cél.}$), valores de eficiência do inversor ($\eta_{inv.}$), área dos módulos fotovoltaicos ($A_{mod.}$) e da fração da área de superfície com células solares ($f_{cél.}$).

A determinação do valor de potência produzida pelos módulos fotovoltaicos ($P_{elec.}$) na conversão de energia solar em elétrica é obtida através da seguinte equação:

$$P_{elec.} = A_{mod.} \cdot f_{cél.} \cdot G_T \cdot \eta_{cél.} \cdot \eta_{inv.} \quad (3.4)$$

A determinação do valor da radiação solar total incidente nos módulos fotovoltaicos (G_T) é obtido através da radiação solar direta ($I_{Dir.}$) e difusa ($I_{Dif.}$), do ângulo de incidência dos raios solares na superfície (θ), do quociente entre área iluminada pelo Sol (S_s), da área total da superfície (S), do fator de ângulo entre a superfície e o céu (F_{ss}) e a superfície e o chão (F_{sg}).

$$G_T = I_{Dir.} \cdot \cos \theta \cdot \frac{S_s}{S} + I_{Dif.} \cdot F_{ss} + I_{Dir.} \cdot F_{sg} \quad (3.5)$$

A caracterização do sistema fotovoltaico é iniciada a partir das ferramentas *Generator: Photovoltaic* e *ElectricLoadCenter: Generators*, onde são agregados todos os módulos fotovoltaicos e caracterizado o tipo de ligação entre módulos fotovoltaicos. A ligação entre todos os equipamentos existentes no

sistema solar fotovoltaico é efetuada no *ElectricLoadCenter: Distribution*, neste caso, será o acoplamento entre os módulos fotovoltaicos e os inversores a serem utilizados no sistema dimensionado.

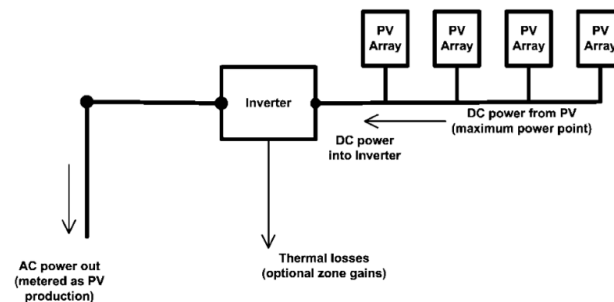


Figura 3.7 – Representação da configuração do sistema fotovoltaico aplicado no *EnergyPlus* [57].

Para uma análise energética realística dos sistemas solares fotovoltaicos teve-se em conta as seguintes perdas:

- valores máximos de perdas que são garantidas pelas marcas de tecnologia solar fotovoltaica para o primeiro ano de funcionamento dos módulos fotovoltaicos. Tendo sido de 97% e 97,5% para a tecnologias monocristalina e policristalina, respetivamente [45][46].
- taxa de 0,7% de degradação anual no tempo de vida dos equipamentos de tecnologia solar fotovoltaica, para ambas as marcas [45][46].
- perdas de transporte de energia elétrica pelos cabos elétricos de 1,7%, este valor corresponde às perdas máxima de um cabo com uma área de secção compreendida entre 1,5 mm² e 10 mm² [47].

É requerida informação ao *EnergyPlus* dos valores do total de energia elétrica produzido pelo sistema fotovoltaico instalado no edifício em análise (*Facility Total Produced Electric Power*). Em termos de informação climática são pretendidos os valores de radiação solar direta e difusa, obtidos através do *Site Direct Solar Radiation Rate per Area* e *Site Diffuse Solar Radiation Rate per Area* [48].

3.4 Potencial Eólico

O potencial eólico nos edifícios em análise e na sua envolvente tem como base a metodologia de aplicação simples e de baixo custo de caracterização do potencial renovável em ambiente urbano, a qual recorre a um modelo digital de terreno urbano e a dados provenientes de modelação numérica de mesoescala. [11].

É ainda usado um modelo CFD (Modelo de dinâmica computacional de fluidos), *UrbaWind*, o qual tem a capacidade de resolver as equações RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) recorrendo ao modelo turbulência $k - \epsilon$, para fecho das equações não lineares. Este modelo aplica o método dos volumes finitos para a resolução das equações, que regem o fluido e gera, automaticamente, as condições de fronteira.

O modelo define a dimensão do domínio computacional, estabelecendo uma distância mínima entre um edifício e uma condição fronteira de 6 vezes a altura do edifício mais alto da área, a simular em todas as direções. Este define uma grelha não estruturada e cartesiana, permitindo sobreposição e efetua um refinamento automático perto do solo junto aos edifícios e aos pontos de interesse. Ao contrário de outros modelos da mesma natureza, este modelo tem a capacidade de resolver de forma

automática a maioria das situações mais complexas, características das zonas urbanas, sem a necessidade de efetuar ajustes, devido ao refinamento automático [49].

Ao introduzir o modelo digital da envolvente urbana dos edifícios propostos para análise do potencial eólico no *UrbaWind*, é possível indicar características de rugosidade (*roughness*) envolvente e definir superfícies nas áreas onde se pretende caracterizar de forma mais detalhada o recurso eólico do local.

As superfícies de interesse são caracterizadas por planos horizontais e verticais (Norte-Sul e Este-Oeste) e que abrangem não só os edifícios propostos para análise, como a sua envolvente, com a finalidade de intersectar e identificar potenciais zonas de interesse para implementação das microturbinas.

Na Tabela 3.2 encontra-se os valores de rugosidade aplicados no *UrbaWind*, na identificação do potencial eólico. O valor de rugosidade definido para toda a envolvente do modelo digital urbano do edifício Multisserviços é de 0,30, enquanto para o edifício Centro de Educação Ambiental (CEA) foi considerado um valor de 0,14 para toda a envolvente, exceto na zona a Este do edifício que foi definido o valor de 0,16 por se encontrarem localizadas poucas árvores nesta zona.

Tabela 3.2 – Valores de rugosidade aplicados nos *UrbaWind* para identificação do recurso eólico nos edifícios propostos para análise.

Multisserviços	Centro Educação Ambiental
0,30	0,14 e 0,16

Após a convergência dos resultados direcionais (*Directional Results*) para os setores definidos, é dada a informação da série de dados sintética da velocidade e direção do vento obtido da modelação mesoescala e das curvas de potência analisadas das possíveis microturbinas eólicas a ser implementadas no edifício.

Os dados climáticos horários referentes à velocidade e direção do vento são obtidos a partir de modelos numéricos de mesoescala (MM5) com uma resolução de 5 km por 5 km, a uma elevação de 80 m dos edifícios propostos para análise, com o propósito de ter uma série de dados que não seja influenciada pela complexidade do terreno.

O *UrbaWind* dá como *output* a possibilidade de identificar, nas áreas de interesse de estudo, os valores de:

- velocidade média do vento anual;
- parâmetros *A* e *k* da distribuição de Weibull;
- energia elétrica anual produzida por cada microturbina analisada.

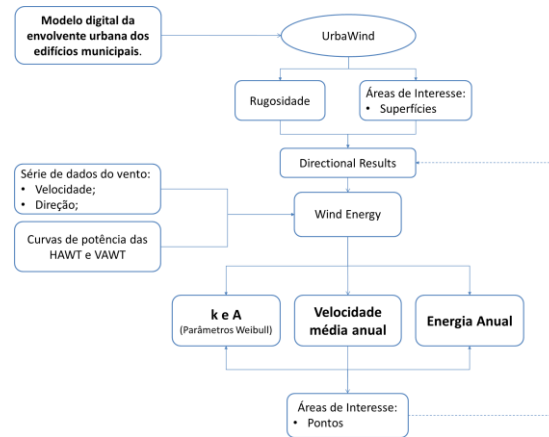


Figura 3.8 - Metodologia aplicada na determinação do potencial eólico incidente nos edifícios em análise.

É de salientar que foram, sempre que possível, aplicadas diversas “regras” de boas práticas na modelação CFD com o intuito de obter resultados de CFD precisos e confiáveis em ambiente urbano. Como exemplo, a inclusão de parâmetros apropriados de rugosidade e localização dos parâmetros de entrada da velocidade média do vento, a verificação cuidadosa da geometria do edifício em análise, entre outros. [50].

Com a finalidade de obter uma estimativa horária realística do potencial eólico em ambiente urbano é determinado o coeficiente de calibração (C_{calib}), o qual é aplicado aos valores da série de dados horária da velocidade do vento obtidos do modelo de mesoescala. A aplicação deste coeficiente demonstra a influência dos obstáculos no comportamento do vento, que não seria bem caracterizada apenas com a aplicação da Lei de Potência (equação 2.3).

A partir da Lei de Potência é então transposta a série de dados da velocidade do vento obtido no modelo mesoescala ($v_{Mesoescala}$) para a altura pretendida nos locais a estudar – edifício Multisserviços, e no local onde se encontra a microturbina instalada no edifício Centro Educação Ambiental de Torres Vedras.

Através da análise da série de dados da velocidade do vento é possível identificar o valor anual da velocidade média do vento ($\overline{v_{Mesoescala}}$) para altura em questão e no *UrbaWind* é obtida informação anual referente à velocidade média do vento ($\overline{v_{UrbaWind}}$) para um possível ponto de interesse.

Com os dados obtidos é possível determinar o fator de calibração, C_{calib} , que resulta do quociente entre as velocidades médias do vento obtidas no *UrbaWind* com a da série de dados obtida a partir do modelo mesoescala.

$$C_{calib} = \frac{\overline{v_{UrbaWind}}}{\overline{v_{Mesoescala}}} \quad (3.6)$$

Através do produto entre o C_{calib} e a velocidade horária da série de dados de mesoescala ($v_{Mesoescala}$), é possível aproximar a velocidade da série de dados de mesoescala à realidade em ambiente urbano (v_{calib}).

$$v_{calib} = C_{calib} \cdot v_{Mesoescala} \quad (3.7)$$

A estimativa de produção de energia elétrica a partir dos valores obtidos só é possível com as curvas de potência das microturbinas a implementar no edifício, essencial para as análises energéticas e económicas. De modo a obter-se a potência para cada registo de 1 hora em função da velocidade do vento, aplicou-se uma função polinomial de grau 20, sendo este, o número de coeficientes resultante do melhor ajuste polinomial obtido para cada curva de potência dos microturbinas (Anexo F).

3.5 Análise energética

No caso de uma Unidade de Pequena Produção (UPP) é tido em conta apenas o valor de produção de energia elétrica por parte do sistema de energia renovável, uma vez que a totalidade da energia elétrica produzida será transacionada com a Rede Elétrica de Serviço Público (RESP), como está estabelecido no Decreto-Lei n.º 153/2014.

Numa Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) a análise energética terá em atenção o comportamento dos sistemas de produção de energia elétrica de origem renovável e o perfil de consumo dos edifícios em análise.

Na Figura 3.9 está representado, graficamente, um diagrama de carga elétrica de um edifício com UPAC. A letra A corresponde ao valor da energia elétrica consumida pelo edifício e fornecida pela RESP, enquanto a letra B corresponde à energia elétrica produzida pelos sistemas de energia renovável e consumida no próprio edifício e C é o excedente de energia elétrica produzido pelo sistema de energia renovável e injetado na RESP. O perfil diário de consumo de um edifício está representado por A e B e o perfil de produção de energia elétrica de origem renovável corresponde a B e C.

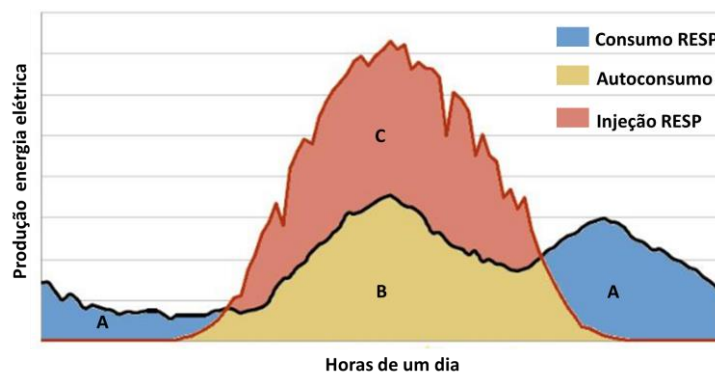


Figura 3.9 - Representação de um diagrama de carga elétrico de um edifício com UPAC. (A) Energia elétrica consumida pelo edifício fornecida pela RESP, (B) Energia elétrica produzida pela UPAC e consumida no edifício e (C) Excedente de energia elétrica e injetada na RESP.

Os valores associados ao autoconsumo correspondem à proporção de energia elétrica de origem renovável que será consumida no próprio edifício do total produzido pelos equipamentos de energia renovável (equação 3.8). Outro valor importante a analisar é o excedente de produção de energia elétrica por parte dos equipamentos de energia renovável e que será injetada na RESP (equação 3.9).

$$\text{Autoconsumo} = \frac{B}{B + C} \quad (3.8)$$

$$\text{Excedente - produção} = \frac{C}{B + C} \quad (3.9)$$

Ao nível do perfil de consumo do edifício, é interessante analisar a capacidade do edifício em ser autossuficiente. Este valor representa a proporção de energia elétrica renovável produzida pela UPAC que é suficiente para atender as necessidades elétricas dos edifícios em análise.

$$\text{Autossuficiente} = \frac{B}{A + B} \quad (3.10)$$

A determinação da finalidade da energia elétrica concebida na UPAC terá em conta os valores de produção eletricidade dos sistemas de energia renovável (E_{SER}) e os valores de consumo de energia elétrica do edifício (E_{carga}) com base nos seguintes conceitos:

- se o valor de E_{SER} for inferior ao valor E_{carga} , a totalidade de energia elétrica produzida pelos sistemas de energia renovável será consumido no próprio local de produção.
- se verificar que o valor de E_{SER} for superior ou igual ao E_{carga} , será efetuado duas análises à energia elétrica. Uma referente à que será consumida no local de produção e outra à que resulta do excedente de produção e que será transacionada à RESP.

3.6 Análise económica

Devido à dimensão dos sistemas de energia renovável a serem implementados nos edifícios, a realização de uma análise económica apropriada ao projeto dos sistemas UPAC e UPP é crucial, com o intuito de analisar a viabilidade, a estabilidade e a rentabilidade associadas à implementação dos sistemas de energia renovável. Para tal foram determinados e analisados diversos indicadores económicos tendo-se estudado alguns trabalhos realizados nesta área para sistemas fotovoltaicos com autoconsumo e armazenamento de energia em Portugal [51].

Para a decisão de instalação de projetos de UPAC e UPP, é necessário determinar a viabilidade do investimento, que terá em conta os seguintes indicadores económicos:

- **Valor Atual Líquido – VAL**

O Valor Atual Líquido (VAL) é a diferença entre as entradas e as saídas de dinheiro, denominado *cash-flow*, sendo atualizados durante o seu período de vida de funcionamento do equipamento.

$$VAL = \sum_{j=1}^n \frac{R_{Lj}}{(1+a)^j} - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{I_j}{(1+a)^j} \quad (3.11)$$

Onde n corresponde à vida útil do equipamento, a corresponde à taxa de atualização, I_j é o investimento efectuado no ano j e R_{Lj} é a receita líquida obtida para o ano j , sendo obtido a partir da seguinte equação:

$$R_{Lj} = R_j - d_{O\&Mj}I_t \quad (3.12)$$

O valor de R_{Lj} é obtido através da diferença entre a receita bruta anual (R_j) e os encargos anuais associados à O&M dos equipamentos ($d_{O\&Mj}I_t$).

A obtenção de um valor positivo do VAL indica a viabilidade económica do projeto. Nesse caso os resultados alcançados permitem cobrir o investimento inicial, a remuneração mínima exigida pelo investidor (representada pela taxa de atualização) e de ainda ser gerado um excedente financeiro.

- **Taxa Interna de Rendibilidade (TIR)**

A Taxa Interna de Rendibilidade (TIR) é a taxa de atualização que anula o VAL, logo a TIR resulta da equação de definição do VAL, satisfazendo a condição:

$$\sum_{j=1}^n \frac{R_{Lj}}{(1+TIR)^j} - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{I_j}{(1+TIR)^j} = 0 \quad (3.13)$$

A obtenção de um valor de TIR superior à taxa de atualização considerada no cálculo do VAL, significa que o projeto consegue gerar uma taxa de rentabilidade superior ao custo de oportunidade do capital, pelo que estará, em princípio, perante um projeto economicamente viável.

- **Retorno do Investimento - ROI**

O Retorno do Investimento (ROI) define-se:

$$ROI = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{R_{Lj}}{(1+a)^j}}{\sum_{j=0}^{n-1} \frac{I_j}{(1+a)^j}} \quad (3.14)$$

O ROI é uma medida da rentabilidade efetiva do projeto por unidade de capital investida, logo quando o valor de ROI=1 significa que por cada unidade investida é obtido precisamente uma unidade. Ao obter um valor de ROI=1 implica que o valor de VAL=0.

- **Período de Recuperação- T_r**

O Período de Recuperação (T_r) é o número de anos necessário à recuperação do investimento inicial, tendo em conta os valores futuros de *cash-flow*.

$$\sum_{j=1}^{T_r} \frac{R_{Lj}}{(1+a)^j} = \sum_{j=0}^{n-1} \frac{I_j}{(1+a)^j} \quad (3.15)$$

- **Custo Normalizado de Energia - Levelized Cost of Electricity - LCOE**

O *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) é o desígnio para o custo da eletricidade produzida durante o tempo de vida de uma unidade de conversão de energia, seja renovável ou não renovável. A obtenção deste valor resulta do quociente entre os custos totais de um sistema produtor de eletricidade durante o seu tempo de vida e da estimativa de eletricidade produzida durante esse período de tempo (E_j).

$$LCOE = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{I_j + d_{O\&Mj}}{(1+a)^j}}{\sum_{j=1}^n \frac{E_j}{(1+a)^j}} \quad (3.16)$$

Na análise económica são tidos em conta os valores associados ao custo de instalação, de O&M, receitas económicas futuras que são geradas pelos equipamentos instalados e os valores de taxas de registos associadas às instalações UPAC ou UPP.

Os encargos associados à tecnologia de origem renovável e seus componentes para a produção de eletricidade tem como base o valor médio dos equipamentos que foram identificados da análise efetuada às empresas que comercializam este tipo de equipamentos no mercado português. No caso de não ser possível identificar o custo associado aos equipamentos no mercado português, essa análise passa a ser efetuada a empresas existentes no mercado europeu (Anexo G). Foi identificado e analisado os valores dos principais equipamentos relacionados com o tipo de sistema de energia renovável em estudo, sendo que os valores aplicados nos custos de aquisição dos equipamentos não consideram IVA.

Os encargos associados à instalação e a outros equipamentos correspondem a 10% do valor total de cada sistema. A obtenção deste valor resulta do intervalo de um montante obtido através de um orçamento de uma empresa portuguesa de instalação deste tipo de equipamentos.

O valor definido para a taxa de atualização corresponde a 4% [51], enquanto os custos de O&M anuais corresponde acerca de 1% do investimento total para o sistema solar fotovoltaico e 2% para o sistema com microturbina eólica [51] [52]. O valor de inflação a ser aplicado à tarifa de energia elétrica e aos custos de operação e manutenção ao longo do período de vida dos equipamentos é de 0,6% [52].

Tabela 3.3 – Parâmetros económicos aplicados para a realização da análise económica à UPP e UPAC.

O&M		Tempo de vida			Taxa		Custo de Instalação [%]
Solar [%]	Eólica [%]	Solar [anos]	Eólica [anos]	Inversor [anos]	Desconto [%]	Inflação [%]	
1	2	25	15	10	4	0,6	10

O valor do tempo de vida dos módulos fotovoltaicos a aplicar em ambas as análises é de 25 anos e a microturbina será analisada para um período de 15 anos [51][52]. Em ambas as tecnologias de produção de energia elétrica renovável será tido em conta para um período de vida de 10 anos para os inversores, sendo substituídos ao final desse período de vida e contabilizado o impacto dessa substituição nos custos anuais a ser realizada na análise económica [52].

Na análise económica teve-se em conta as taxas impostas pelo Decreto-Lei n.º 153/2014, tendo sido contabilizado as taxas referentes ao registo e à inspeção periódica da UP. De salientar que o valor da taxa de registo foi aplicado inicialmente juntamente com a inspeção inicial a realizar à UP, sendo esta última taxa é aplicada em períodos de 10 em 10 anos.

O valor da tarifa transacionada a ser aplicada na venda de energia elétrica das UPP corresponde à categoria I.

Relativamente às unidades UPAC, é tido em conta as seguintes variáveis na receita económica:

- valor da tarifa de compra de energia elétrica ativa ($T_{Energia,h}$) e de redes de energia elétrica ativa ($T_{Redes,h}$) aplicado em cada ciclo horário estabelecido no ano de 2016 pela comercializadora elétrica ao município de Torres Vedras para cada edifício proposto.
- imposto referente ao consumo de eletricidade ($Imp_{eletricidade}$) que será poupado na fatura elétrica.

Logo, a receita bruta esperada pela instalação do sistema do tipo UPAC tem em conta o valor da tarifa final evitado ($T_{elétrica}$):

$$T_{elétrica} = T_{Energia,h} + T_{Redes,h} + Imp_{eletricidade} \quad (3.17)$$

A receita esperada pela poupança gerada pela não aquisição de energia elétrica à rede elétrica (R_{UPAC}) resulta do produto entre a energia elétrica produzida pelos sistemas de energia renovável e consumida no edifício (E_{UPAC}) e $T_{elétrica}$, através da seguinte equação:

$$R_{UPAC} = E_{UPAC} \cdot T_{elétrica} \quad (3.18)$$

O valor da tarifa de venda do excedente de produção de energia elétrica à RESP tem como base o valor mensal para o ano de 2016 da média aritmética simples dos preços de fecho do Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal [53].

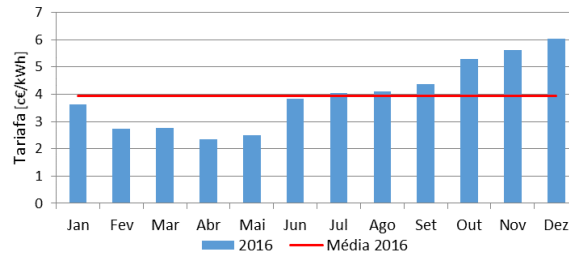


Figura 3.10 - Valores mensais do ano de 2016 da média aritmética simples dos preços de fecho do OMIE para Portugal.

A venda por parte do município do excedente de energia elétrica produzida pelos sistemas e não consumida nos edifícios é calculada a partir da equação 2.16. A receita bruta mensal ($Receita_m$) resulta das duas receitas abordadas anteriormente.

$$Receita_m = R_{UPAC,m} + R_{RESP,m} \quad (3.19)$$

4. Aplicação da Metodologia Desenvolvida

4.1 Potencial solar da cidade de Torres Vedras e nos edifícios municipais

Na Figura 4.1 é possível constatar a inclinação da cobertura do edifício Multisserviços e o modelo digital da cidade de Torres Vedras que foi aplicado no cálculo do mapeamento do recurso, respetivamente.

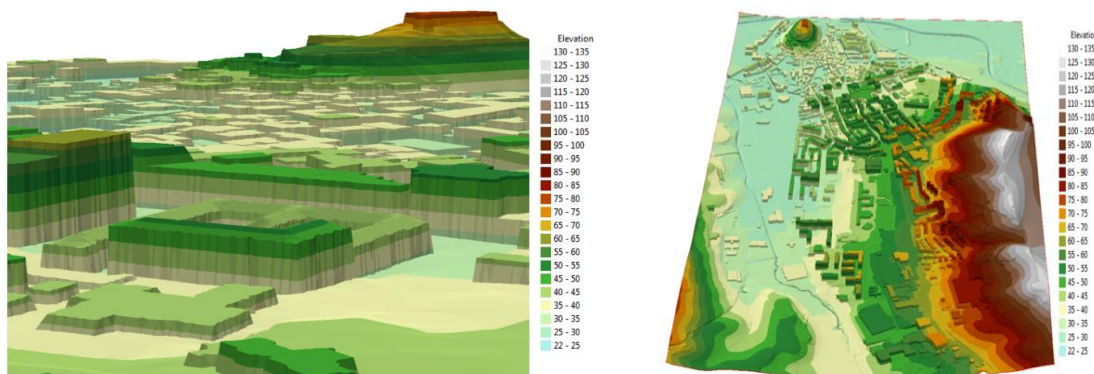


Figura 4.1 - Modelo digital de elevação da cidade da cidade de Torres Vedras aplicada no estudo do potencial solar. É possível identificar a inclinação da cobertura do edifício Multisserviços da C. M. de Torres Vedras.

Na análise realizada aos valores de radiação solar provenientes do SCE-Climas obteve-se um valor anual de $1,71 \text{ MWh/m}^2$ de radiação solar global incidente para uma superfície horizontal, tendo sido determinados os valores de proporção difusa e transmissividade a serem aplicados no cálculo do mapeamento do recurso solar da cidade de Torres Vedras (Tabela 4.1).

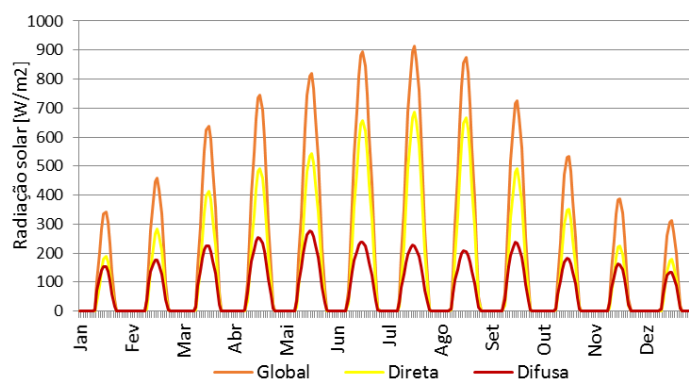


Figura 4.2 – Média mensal da radiação global, direta e difusa para a cidade de Torres Vedras, valores obtidos no SCE-Climas.

Tabela 4.1 - Valores de proporção difusa e transmissividade aplicado no mapa do potencial solar da cidade de Torres Vedras.

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
P_{dif}	0,48	0,42	0,39	0,37	0,37	0,29	0,27	0,26	0,36	0,37	0,45	0,46
τ	0,47	0,51	0,58	0,58	0,59	0,63	0,64	0,65	0,62	0,56	0,51	0,46

No mapa do potencial solar da cidade de Torres Vedras (Figura 4.3) é possível verificar que os valores mais elevados da radiação solar global são referentes a áreas livres e na vertente da elevação devido à orientação e inclinação, mais precisamente onde se situa o Castelo de Torres Vedras.

A variação da distribuição da radiação solar global é visível nos declives e orientações dos terrenos nas encostas da Serra das Marvas (zona Este) e na elevação onde está localizado o Castelo. Outro aspeto importante é a identificação dos valores menos elevados de radiação solar global, que se verificam nas ruas da cidade de Torres Vedras e que estão associadas ao sombreamento provocado pelos edifícios urbanos.

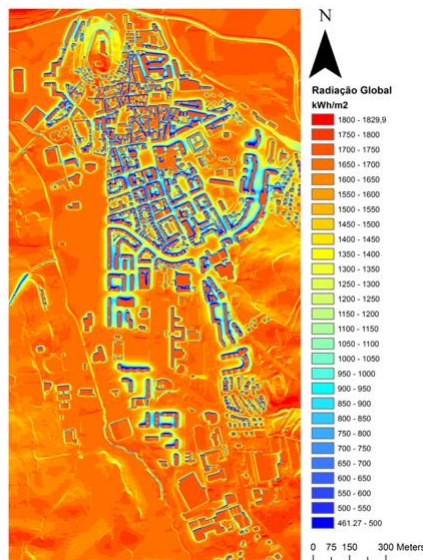


Figura 4.3 - Mapa da radiação global anual para a cidade de Torres Vedras

Através da Figura 4.4 é possível identificar zonas da cobertura do edifício Multisserviços que são de interesse para instalar tecnologia solar fotovoltaica. É de salientar que os valores mais elevados de radiação solar são obtidos na referida cobertura, devido à caracterização da inclinação e orientação.

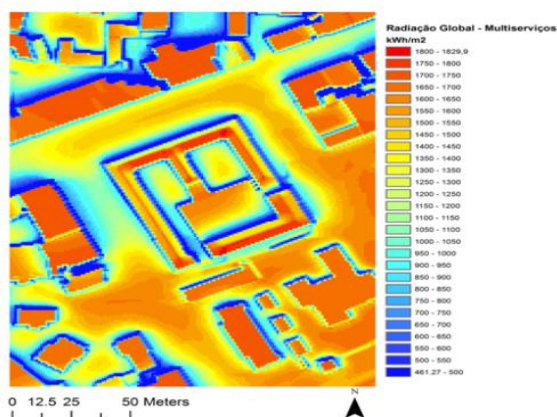


Figura 4.4 - Radiação global anual incidente na cobertura dos edifícios Multisserviços da C. M. de Torres Vedras.

As coberturas com um valor de azimuth de 154° Este é onde se obteve valores mais elevados de radiação solar global, sendo seleccionadas para a implementação das tecnologias solares fotovoltaicas (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Valores de radiação solar global obtidos na cobertura do edifício Multisserviços da C. M. de Torres Vedras

Azimute	154° Este	244° Oeste
Inclinação	18°	27°
Radiação solar [MWh/m²]	1,79 a 1,81	1,75 a 1,79

Apesar de não ter a orientação ideal para a implementação de tecnologias solares fotovoltaicas, é interessante analisar a cobertura com um valor de azimute de 244° Oeste, devido à área útil existente nessa cobertura. Nesta cobertura, o impacto do edifício localizado nas envolventes do edifício Multisserviços é notório em comparação com as coberturas descritas no parágrafo anterior, sendo um decréscimo de pelo menos 5,7% do valor de radiação solar global.

No Centro de Educação Ambiental (CEA) é caracterizado por valores de radiação solar global muito idênticos, exceto nas zonas em que existe diferença de altura da cobertura, o que origina uma redução dos valores de radiação solar (Figura 4.5 e Tabela 4.3).

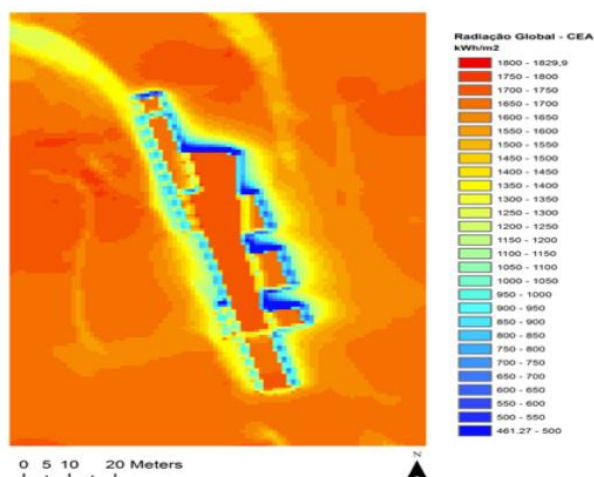


Figura 4.5 - Radiação global anual incidente na cobertura dos edifícios CEA da C. M. de Torres Vedras.

Tabela 4.3 - Valores de radiação solar global obtidos na cobertura do CEA da C. M. de Torres Vedras.

	Cobertura sem sombreamento	Cobertura com sombreamento
Radiação solar [MWh/m ²]	1,70	1,56 a 1,69

Na Tabela 4.4 encontram-se os módulos solares aplicados no cálculo da determinação da estimativa do valor produção de energia elétrica por parte das Unidades Produção (UP) a serem implementadas nos edifícios Multisserviços e CEA. Os inversores identificados e analisados têm a capacidade funcionar nas duas UP analisada, alterando apenas a distribuição das *strings*, e tem valores a rondar os 98%.

Tabela 4.4 - Características técnicas dos módulos fotovoltaicos aplicados para a realização do trabalho.

Tecnologia	η [%]	$P_{\text{mód.}}$ [Wp]	V_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	V_{OC} [V]
Monocristalino	17,3	290	31,9	9,2	39,6
Policristalino	16,8	275	29,8	8,6	35,4

Com a realização de uma visita ao edifício Multisserviços verificou-se que os equipamentos de climatização e ventilação se encontram localizados numa área que não afeta a instalação dos módulos fotovoltaicos e não existem objetos que provoquem sombreamento.

Assim, foi identificada uma área de implementação de 471 m², com capacidade de implementar 230 módulos solares, totalizando uma área total de módulos de 385,64 m² para o monocristalino e 376,46

m² para o policristalino, o que equivale a uma potência instalada de 66,70 kWp e 63,25 kWp, respetivamente (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Identificação das áreas, número de módulos e potência a ser instalada no edifício Multisserviços.

Tecnologia	A _{disponível} [m ²]	Nº módulos	A _{módulos} [m ²]	A _{células} [m ²]	P _{inst.} [kW _p]
Monocristalino	471	230	385,64	335,84	66,70
Policristalino			376,46		63,25

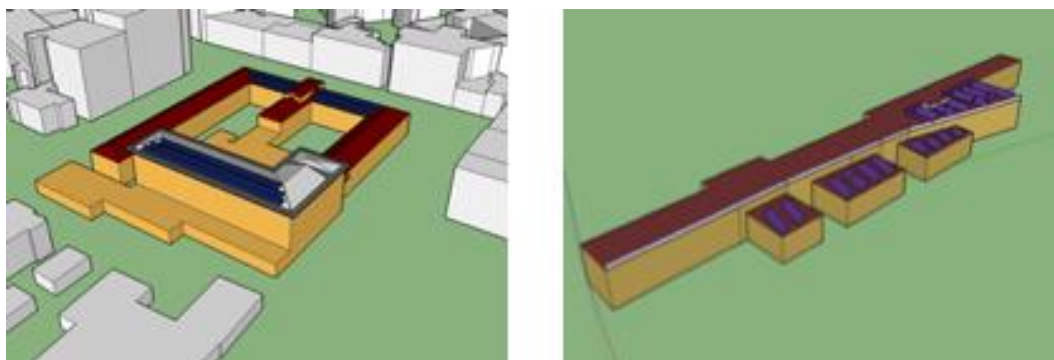


Figura 4.6 - Representação à esquerda do edifício Multisserviços com uma possível organização dos equipamentos solar fotovoltaicos através do plug-in *Skelion* e à direita representação do edifício CEA aplicado no *EnergyPlus* para estimativa de produção dos equipamentos solar fotovoltaico.

A Tabela 4.6 e Figura 4.7 encontra-se os valores de produção de energia elétrica anual e mensal, respetivamente, das duas tecnologias solares fotovoltaicas em análise. A tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino é a que apresenta maior produção energética, sendo esta 2,39% superior à tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino. Quando se efetua uma comparação em termos de produção mensal, a diferença oscila entre os 2,34% e os 2,40%.

Tabela 4.6 – Valores de produção de energia elétrica das tecnologias solares fotovoltaicas no edifício Multisserviços.

	Monocristalino	Policristalino
Energia elétrica [MWh]	104,06	101,64

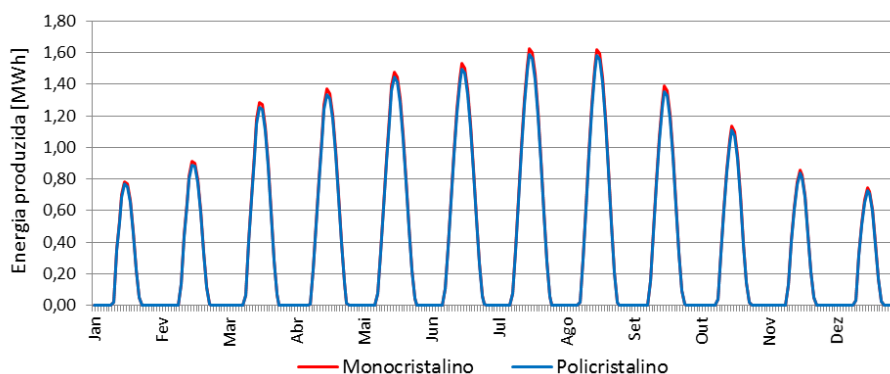


Figura 4.7 - Produção total horária dos equipamentos solares monocristalino e policristalino para o edifício Multisserviços.

No edifício CEA foi definido que na área onde se encontra implementado os módulos fotovoltaicos em regime microprodução, os módulos a ser instalados têm as mesmas características ao nível da

orientação e inclinação. O espaçamento entre módulo e muro é determinado em função do valor máximo do comprimento da sombra provocada pelo muro ao meio dia no solstício de Inverno. Foi estabelecida uma distância lateral de 1m entre os módulos e o muro de proteção, para passagem e minimização do sombreamento que poderá ocorrer na superfície dos módulos.

Na outra zona da cobertura disponível para instalar os módulos fotovoltaicos, mais a Este, é assumido uma orientação de 180° Sul e uma inclinação de 39°. Tendo sido estabelecido um espaçamento lateral a rondar os 2m entre os módulos e o muro de proteção, para zona de passagem e para minimizar o impacto do sombreamento nos módulos fotovoltaicos.

Foi identificada uma área útil de implementação de 358 m² para as tecnologias solares fotovoltaicas. A área disponível tem a capacidade de instalar cerca de 79 módulos, o que perfaz uma área de total de módulos monocristalino de 132,46 m² e de policristalino de 129,31 m². Ao sistema monocristalino está associado um valor de potência de instalado de 22,91 kW_p, de 21,73 kW_p para o sistema policristalino (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 - Identificação das áreas, número de módulos e potência a ser instalada no edifício CEA.

Tecnologia	A_{disponível} [m²]	Nº módulos	A_{módulos} [m²]	A_{células} [m²]	P_{inst.} [kW_p]
Monocristalino	358	79	132,46	115,35	22,91
Policristalino			129,31		21,73

A Tabela 4.8 e Figura 4.8 apresentam os valores de produção de energia elétrica anual e mensal, respetivamente, das duas tecnologias solares fotovoltaicas em análise. Obteve-se uma estimativa anual de produção de energia elétrica de 34,74 MWh para o sistema monocristalino e 33,87 MWh para o sistema policristalino. A tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino é a que apresenta maior produção energética, sendo esta 2,55% superior à tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino. A estimativa anual de produção do sistema fotovoltaico em regime de microprodução é de 4,05 MWh.

Tabela 4.8 – Valores de produção de energia elétrica das tecnologias solares fotovoltaicas no edifício CEA.

	Monocristalino	Policristalino	Microprodução
Energia elétrica [MWh]	34,74	33,87	4,05

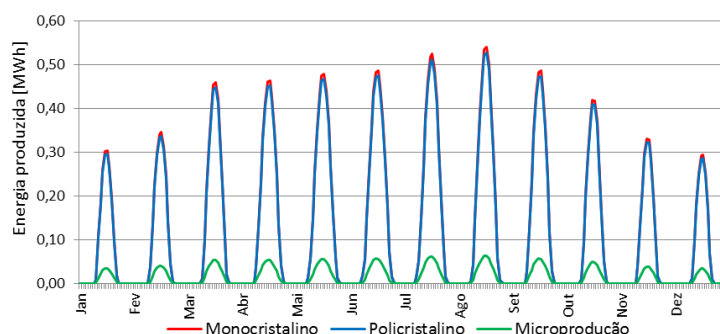


Figura 4.8 - Produção total horária dos equipamentos solares monocristalino e policristalino para o edifício CEA.

4.2 Potencial eólico da cidade de Torres Vedras e edifícios municipais

A caracterização da velocidade e direção do vento obtidas no modelo mesoescala estão representadas na Figura 4.09. Estes dados correspondem à localização geográfica do edifício Multisserviços para a altura de 80m acima do solo. Em relação à série de dados aplicados na análise do CEA, os valores são muito idênticos, uma vez que o domínio do modelo de mesoescala abrange uma grande área.

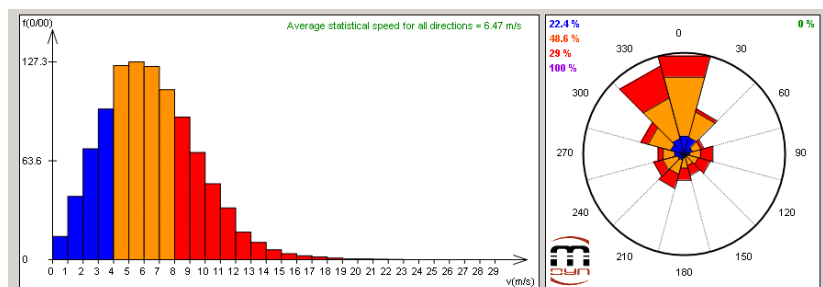


Figura 4.9 – Frequência de ocorrência e direção da série de dados da velocidade do vento para o edifício Multisserviços, obtidos no modelo mesoescala para a altura de 80m.

Na Figura 4.10 encontram-se os modelos digitais aplicados para a determinação do recurso eólico dos edifícios propostos pela C. M. de Torres Vedras.



Figura 4.10 - Maquete urbana aplicada no estudo do potencial eólico nos edifícios propostos para análise por parte do município de Torres Vedras.

A seleção do local das microturbinas eólicas a instalar no edifício Multisserviços passa pela análise do potencial existente no próprio edifício (pátio interior) e na sua envolvente (Figura 4.11).

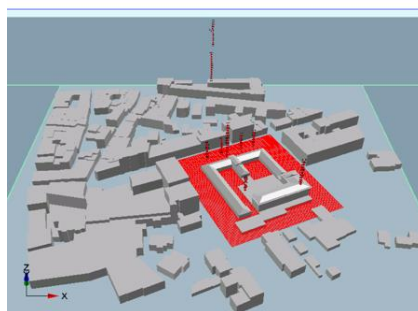


Figura 4.11 - Maquete da zona urbano do edifício Multisserviços aplicada no *UrbaWind*. A malha abrange o edifício e a sua envolvente, sendo ainda indicado os pontos de possíveis locais de interesse para a instalação de uma microturbina

É possível verificar na Figura 4.12 os valores de velocidade média do vento para o edifício Multisserviços. A velocidade média do vento atinge valores entre os 2,30 m/s e os 3,14 m/s na envolvente do edifício para uma altura de 12 m acima do solo, enquanto no pátio interior do edifício

os valores de velocidade média do vento estão compreendidos entre os 3,71m/s e 3,94 m/s a uma elevação de 15 m acima do solo.

Apesar de se ter obtido valores superiores de velocidade média do vento no pátio interior do edifício, a análise da estimativa de produção da microturbina será efetuada na zona exterior do edifício. Tal deve-se ao desconhecimento do impacto da instalação de uma torre eólica na estrutura do edifício, sendo essa avaliação necessária e a realizar por peritos qualificados.

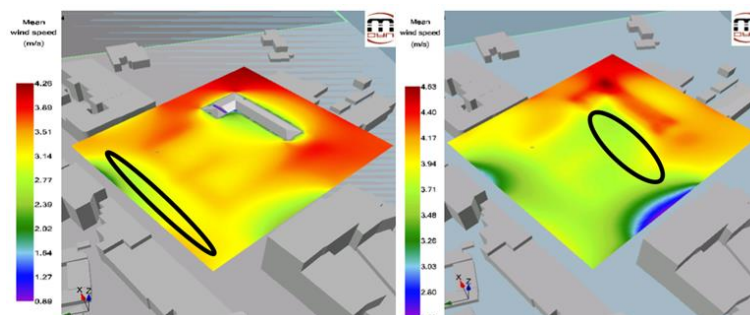


Figura 4.12 -Malha da velocidade média do vento no edifício Multisserviços. Imagem da esquerda corresponde à altura de 12 m acima do solo e da direita corresponde a 15 m acima do solo.

Na Tabela 4.09 encontra-se os valores das velocidades médias do vento e os parâmetros A e k de Weibull, do recurso eólico obtidos através do *UrbaWind* e da aplicação da Lei de Potências da série de dados da velocidade de vento para a altura de 13 m, para o edifício Multisserviços.

Tabela 4.9 – Valores da velocidade média e parâmetros de Weibull obtidos da série de dados da velocidade do vento para a altura de 13m no edifício Multisserviços.

	v [m/s]	A	k
UrbaWind	2,70	3,07	2,13
Lei de Potências	3,68	4,15	2,15

A caracterização da velocidade e direção do vento obtidas para o edifício Multisserviços do possível local de implementação das microturbinas eólicas encontra-se representada na Figura 4.13.

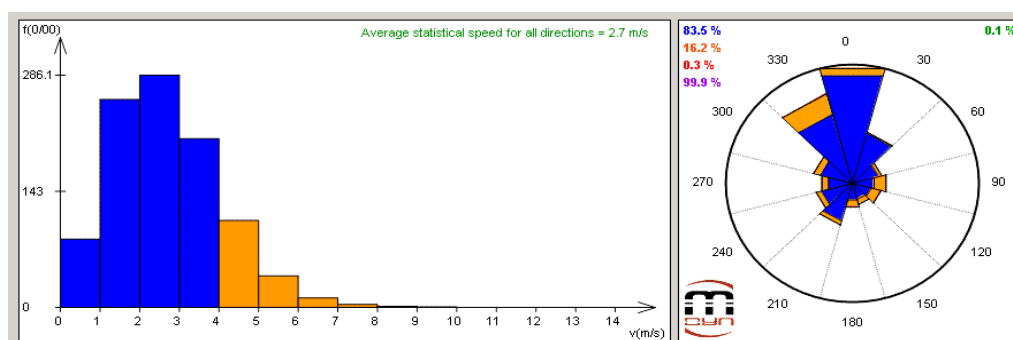


Figura 4.13 - Frequência de ocorrência da velocidade do vento e direção para o local de possível instalação da microturbina para o edifício Multisserviços, obtidos no *UrbaWind*.

Foram identificadas as curvas de potência das microturbinas do tipo HAWT e VAWT aplicadas nos diversos casos de estudo e analisadas no presente trabalho (Figura 4.14).

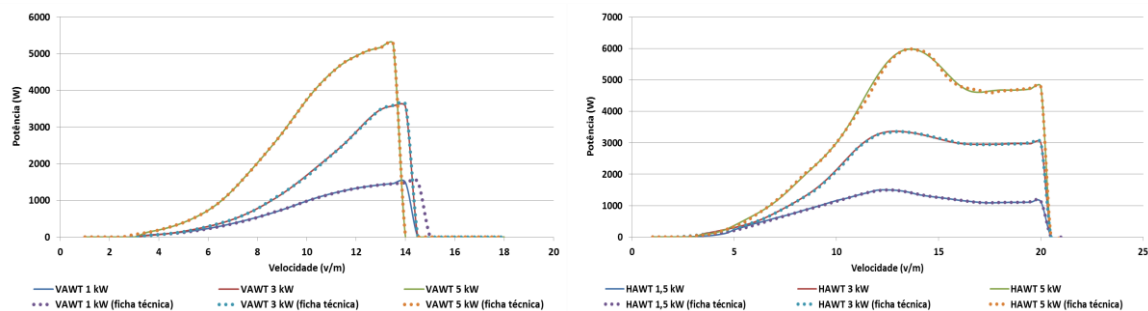


Figura 4.14 – Curvas de potência das turbinas VAWT e HAWT aplicadas para a realização do trabalho. A linha tracejada corresponde aos valores retiradas das fichas técnicas das respetivas microturbinas e a linha contínua aos valores aplicados no cálculo de produção de energia elétrica.

Associados às UP com microturbinas estão os inversores eólicos. Os inversores eólicos identificados e analisados são adequados para microturbinas referidas anteriormente, tendo valores de eficiência compreendidos entre os 96,0% e os 96,4%.

Na Tabela 4.10 pode-se constatar que os valores de energia elétrica anual produzida após a aplicação do coeficiente de calibração na série de velocidade do vento. No mês de dezembro é atingido o valor mais elevado de produção elétrica mensal pelas microturbinas eólicas, enquanto no mês de junho e agosto foi obtido os menores valores de produção (Figura 4.15).

Tabela 4.10 – Valores de produção de energia elétrica anual das microturbinas analisadas obtidos pelo *UrbaWind* e pelo coeficiente de calibração que foi aplicado à série da velocidade do vento.

Potência	HAWT			VAWT		
	1,5 kW	3 kW	5 kW	1 kW	3 kW	5 kW
Calibrado [MWh]	0,38	0,60	0,67	0,28	0,30	0,79

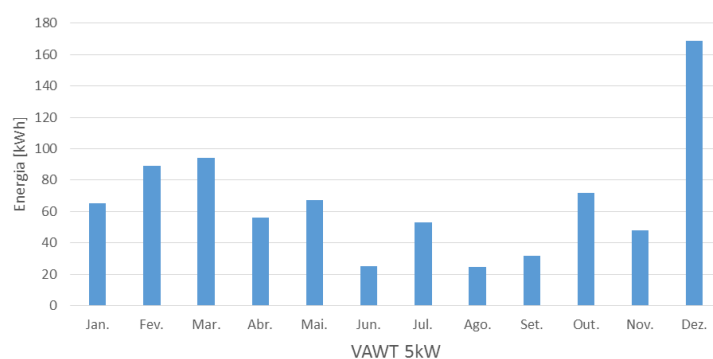


Figura 4.15 - Estimativa de produção mensal de energia elétrica para a microturbina VAWT 5 kW no edifício Multisserviços.

No *UrbaWind* foi possível caracterizar a localização da turbina Proven 2,5 kW instalada nas imediações do edifício CEA (Figura 4.16) e, assim, obter uma estimativa de produção de energia elétrica da microturbina, dos valores da velocidade média do vento e dos parâmetros de Weibull.

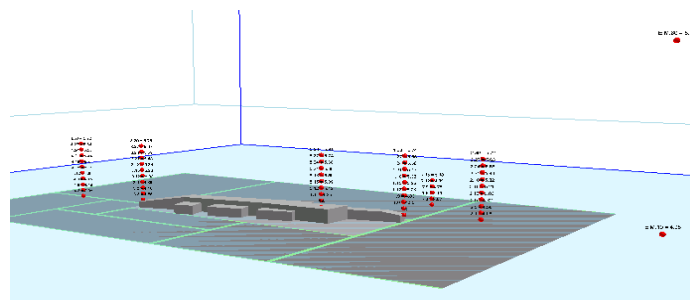


Figura 4.16 – Representação dos pontos analisados para o edifício do CEA.

Na Tabela 4.11 encontram-se os valores obtidos no *UrbaWind* e após aplicação da Lei de Potências da série de dados da velocidade de vento para a altura de 12 m, no local onde se situa o edifício CEA.

Tabela 4.11 - Valores da velocidade média e parâmetros de Weibull obtidos na série de dados da velocidade do vento para a altura de 12 m no edifício CEA.

	v [m/s]	A	k
UrbaWind	4,99	5,49	2,15
Lei de Potências	4,86	5,63	2,15

Em termos de produção de energia elétrica anual foi obtido um resultado de 3,59 MWh. Em termos de produção mensal, no mês de dezembro obteve-se o maior valor de produção de energia elétrica, enquanto no mês de junho e agosto foram obtidos os menores valores de produção (Figura 4.17).

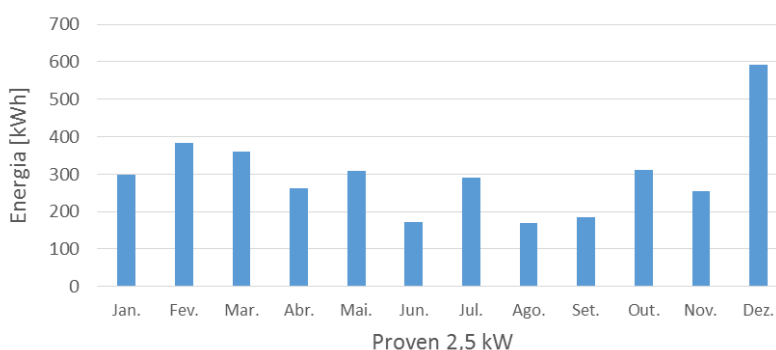


Figura 4.17 - Estimativa de produção horária de energia elétrica para a microturbina Proven instalada no edifício CEA.

4.3 Análise energética aos edifícios municipais

Para a realização da análise energética dos edifícios propostos foram usados os valores de consumo mensais presentes nas faturas disponibilizadas pela Câmara Municipal de Torres Vedras. Desta forma, foi possível obter um perfil de consumo elétrico diário ao longo dos meses do ano.

• Edifício Multisserviços da C. M. de Torres Vedras

O edifício Multisserviços está equipado com diversos equipamentos de consumo de energia elétrica que vão desde equipamentos de climatização dos espaços interiores úteis, de iluminação e de escritório (computadores, impressoras, etc.).

O edifício Multisserviços é um edifício com necessidade de média tensão de energia elétrica e um valor de 250,67 kW de potência contratada.

O consumo de energia elétrica ativa anual é de 365,44 MWh, enquanto ao nível mensal (Tabela 4.18) é possível constatar que nos meses de verão os valores de consumo de energia elétrica ativa são inferiores em relação aos meses de inverno, sendo maio com 21,16 MWh o mês com menor valor de consumo de energia elétrica ativa e janeiro o mês que se verifica o maior consumo de energia elétrica ativa com 42,58 MWh.

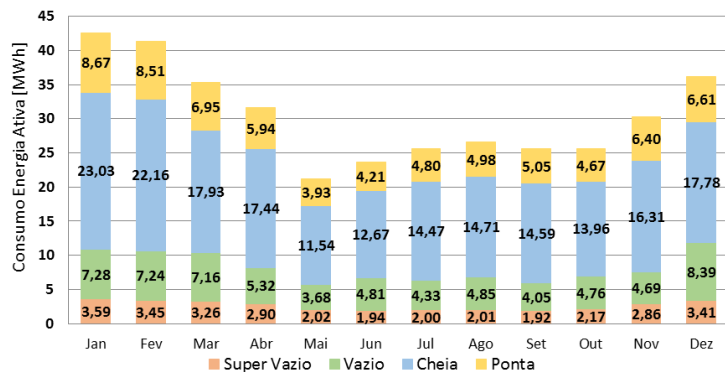


Figura 4.18 - Consumo mensal de energia elétrica ativa do edifício Multisserviços obtido a partir das faturas de eletricidade.

Verifica-se que cerca de 53,79 % do valor do consumo anual de energia elétrica ativa corresponde ao período de cheia e 19,36 % ao período de ponta, períodos esses que coincidem com o horário laboral de funcionamento do edifício Multisserviços. Os períodos de vazio e super vazio correspondem anualmente a cerca de 18,22 % e 8,36 %, respetivamente.

Na Figura 4.19 é possível visualizar a média do perfil de carga semanal das necessidades de potência requeridas à RESP pelo edifício Multisserviços ao longo de um ano. Durante os dias úteis da semana existe, naturalmente, uma maior necessidade de consumo, logo a potência requerida à rede é superior em comparação com os fins-de-semana onde as necessidades de potência são inferiores.

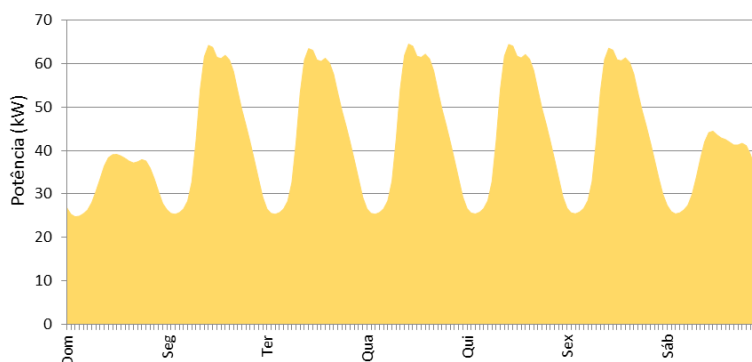


Figura 4.19 - Perfil de consumo médio semanal de energia elétrica do edifício Multisserviços.

Em termos anuais, a variação do perfil de carga horária da potência requerida à rede elétrica oscila entre o valor mínimo de 16,85 kW e o valor máximo de 102,88 kW, obtidos no mês de maio e fevereiro respetivamente (Figura 4.20).

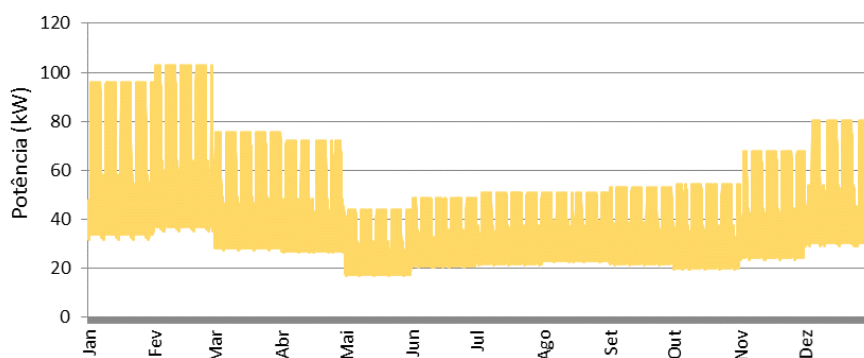


Figura 4.20 – Perfil de consumo semanal de energia elétrica ativa do edifício Multisserviços ao longo do ano.

O impacto energético referente ao primeiro ano de funcionamento de uma Unidade Produção para Autoconsumo (UPAC) no consumo de eletricidade do edifício Multisserviços só com tecnologia solar fotovoltaica encontra-se na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Impacto energético de UPAC com tecnologia solar fotovoltaica no edifício Multisserviços no primeiro ano de funcionamento.

UPAC	Consumo RESP [MWh]	Produção ER [MWh]	Autoconsumo [MWh]	Injeção RESP [MWh]	Novo Consumo RESP [MWh]
Policristalino	365,44	101,64	96,59	5,05	268,85
Monocristalino		104,06	98,32	5,74	267,11

A instalação de uma UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino terá a capacidade de reduzir as necessidades de consumo da RESP em cerca de 26,43% no primeiro ano de funcionamento. Do total de energia elétrica produzida pela UPAC, no primeiro ano 95,03 % será para colmatar as necessidades energéticas do próprio edifício, sendo que o restante valor corresponde ao excedente de produção e que será injetado na RESP.

A UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino terá a capacidade de gerar cerca de 26,91 % das necessidades energéticas do Multisserviços no seu primeiro ano de funcionamento. Cerca de 94,96 % da energia elétrica será produzida e consumida no próprio edifício e cerca de 5,51 % dessa energia elétrica produzida será excedente de produção da UPAC e assim injetada na RESP.

A instalação de um sistema de produção híbrido, com tecnologia solar fotovoltaico e eólica, é uma das possibilidades, podendo verificar-se os valores na Tabela 4.13 referentes a um sistema constituídos por equipamentos do tipo solar fotovoltaica policristalino e microturbinas do tipo HAWT e VAWT.

Em todos os sistemas híbridos analisados, os valores referentes à energia elétrica destinada para autoconsumo são de 95,03%, implicando assim um excedente de energia elétrica que será injetado na RESP de 4,97%. A implementação de sistemas híbridos com as tecnologias referidas terá uma redução das necessidades de energia elétrica à RESP entre os 24,63% e os 24,67%, para as microturbinas do tipo HAWT e valores entre os 26,50% e os 26,64%, para as tecnologias do tipo VAWT.

Tabela 4.13 - Impacto energético de UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo policristalino e microturbinas eólicas (sistema híbrido) no edifício Multisserviços no primeiro ano de funcionamento.

UPAC	Consumo RESP [MWh]	Produção ER [MWh]	Autoconsumo [MWh]	Injeção RESP [MWh]	Novo Consumo RESP [MWh]
Policristalino + HAWT 1,5 kW	365,44	102,02	96,95	5,07	268,49
Policristalino + HAWT 3 kW		102,24	97,16	5,08	268,28
Policristalino + HAWT 5 kW		102,30	97,22	5,08	268,21
Policristalino + VAWT 1 kW		101,92	96,86	5,06	268,58
Policristalino + VAWT 3 kW		101,93	96,87	5,06	268,57
Policristalino + VAWT 5 kW		102,43	97,34	5,09	268,09

Outra possibilidade analisada é de um sistema híbrido onde é utilizada a tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino. Os valores obtidos podem ser constatados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Impacto energético de UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e microturbinas eólicas (sistema híbrido) no edifício Multisserviços no primeiro ano de funcionamento.

UPAC	Consumo RESP [MWh]	Produção ER [MWh]	Autoconsumo [MWh]	Injeção RESP [MWh]	Novo Consumo RESP [MWh]
Monocristalino + HAWT 1,5 kW	365,44	104,44	98,68	5,76	266,75
Monocristalino + HAWT 3 kW		104,66	98,89	5,77	266,54
Monocristalino + HAWT 5 kW		104,73	98,95	5,77	266,48
Monocristalino + VAWT 1 kW		104,34	98,59	5,75	266,84
Monocristalino + VAWT 3 kW		104,36	98,60	5,75	266,83
Monocristalino + VAWT 5 kW		104,86	99,07	5,78	266,36

Como aconteceu no sistema híbrido com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino, os valores referentes de produção de energia elétrica da UPAC para autoconsumo e excedente de energia elétrica injetado na RESP mantiveram-se constante para as diferentes tecnologias eólicas aplicadas no sistema híbrido. Do total de energia elétrica produzido pela UPAC, cerca de 94,49% desse valor será para suprimir as necessidades elétricas do edifício, o que corresponde a um valor produção de excedente de energia elétrica e injetada na RESP de 5,51%. A implementação de sistemas híbridos com as tecnologias referidas terá uma redução das necessidades de energia elétrica à RESP entre os 27,00% e os 27,08% para as microturbinas do tipo HAWT e valores entre os 26,98% e os 27,11% para as tecnologias do tipo VAWT.

Nas seguintes análises mensais efetuadas às UPAC serão tidas em conta as tecnologias com valores superiores de produção de energia elétrica das diversas UP (solar e híbrido) analisadas e comparadas

anteriormente, uma vez que o que os valores de produção e o comportamento anual são idênticos entre os tipos de tecnologia analisado.

A análise energética mensal a uma UPAC com tecnologia solar fotovoltaica pode ser consultada na Figura 4.21. Nos meses de Verão existe um excedente de produção de energia elétrica que é injetada na RESP, em particular devido ao facto de os valores de produção de energia elétrica de origem fotovoltaica serem elevados e os valores de consumo elétrico do edifício Multisserviços serem baixos nesse período do ano.

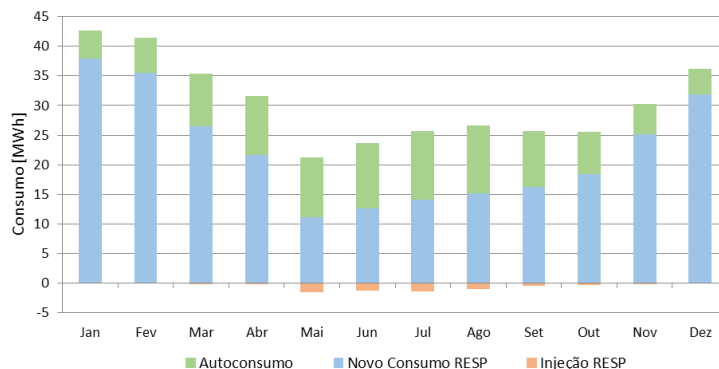


Figura 4.21 - Comportamento mensal do consumo elétrico no edifício Multisserviços com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino.

No mês de maio foram obtidos os valores mais elevados de excedente de produção de energia elétrica, tendo gerado cerca de 1,46 MWh, o que corresponde a cerca de 12,73% da energia elétrica produzida na UPAC nesse mês e uma redução de 47,20% das necessidades de consumo de energia elétrica à RESP.

Entre os meses de junho e agosto registaram-se valores elevados de energia elétrica produzida pela UPAC e que é consumida no próprio edifício. Esses valores rondam os 10,95 a 11,43 MWh, que correspondem a cerca de 89,86% a 92,77% da energia elétrica produzida pela UPAC, tendo capacidade de reduzir em cerca de 42,54% a 46,32% das necessidades de consumo de energia elétrica do edifício. Nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro toda a energia elétrica produzida pela UPAC é consumida no próprio edifício, tendo sido obtido os valores mais baixos de produção da UPAC que rondam os 4,22 a 5,72 MWh. Nos meses de março a abril e de setembro a novembro os valores de excedente de produção de energia elétrica e fornecida à RESP rondam os 0,01 MWh e os 0,41 MWh, que correspondem a 0,28% e os 4,24% da energia elétrica produzida na UPAC, gerando uma redução das necessidades de energia elétrica da RESP entre os 16,67% e os 36,54%.

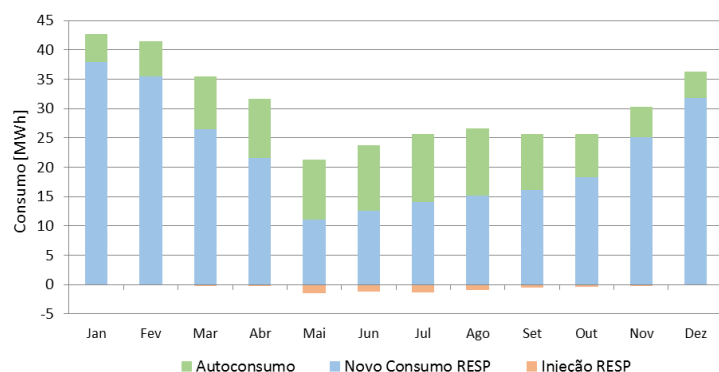


Figura 4.22 - Comportamento mensal do consumo elétrico no edifício Multisserviços com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e microturbina VAWT 5 kW.

Na UPAC analisada com um sistema híbrido com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e microturbina do tipo VAWT 5 kW (Figura 4.22), verifica-se que no mês de maio são obtidos valores elevados de excedente de produção de energia elétrica, tendo gerado cerca de 1,47 MWh, o que corresponde a cerca de 12,74% da energia elétrica produzida na UPAC nesse mês, e uma redução de 47,46% das necessidades de consumo de energia elétrica à RESP. Entre os meses de junho e agosto é onde se verificam os valores mais elevados de energia elétrica produzida pelas UPAC que é consumida no próprio edifício, estes valores que variam entre os 10,97 a 11,48 MWh que correspondem a cerca de 89,81% a 92,75% da energia elétrica produzida na UPAC, tendo capacidade de reduzir em cerca de 42,62% a 46,41% das necessidades de consumo de energia elétrica do edifício. Nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro toda a energia elétrica produzida pela UPAC é consumida no próprio edifício, tendo sido obtidos os valores mais baixos de produção de eletricidade da UPAC que rondam os 4,39 a 5,81 MWh. Nos meses de março a abril e de setembro a novembro os valores de excedente de produção de energia elétrica e fornecida à RESP rondam os 0,01 MWh e os 0,42 MWh, que correspondem a 0,29% e os 4,25% da energia produzida na UPAC, gerando uma redução das necessidades de energia elétrica da RESP entre os 16,83% e os 36,65%.

Na análise efetuada a uma semana típica do período de inverno para a UPAC com sistema híbrido é possível identificar que não existe injeção na RESP devido ao excesso de produção da UPAC (Figura 4.23).

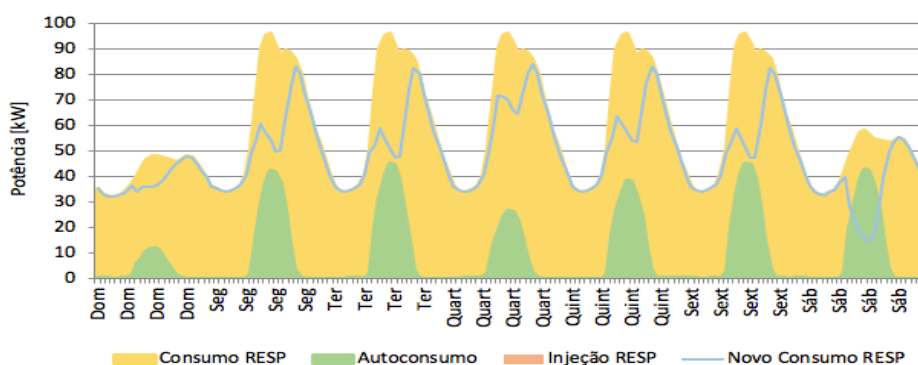


Figura 4.23 -Diagrama de produção e consumo elétrico de uma semana típica de Inverno do edifício Multisserviços com implementação da UPAC com um sistema híbrido.

Para a mesma UPAC, é possível verificar que numa semana típica do período de Verão existe injeção na RESP do excedente de produção de energia elétrica da UPAC (Figura 4.24). Esses valores são superiores no fim-de-semana em comparação com os dias úteis da semana, isso deve-se principalmente à diminuição do consumo de energia elétrica nesses dois dias.

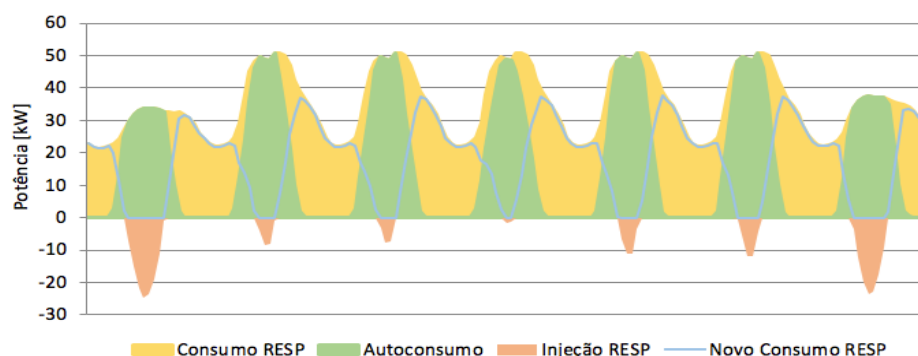


Figura 4.24 - Diagrama de produção e consumo elétrico de uma semana típica de Verão do edifício Multisserviços com implementação da UPAC com um sistema híbrido.

• Centro Educação Ambiental

O edifício CEA está equipado com diversos equipamentos de consumo de energia elétrica, que vão desde equipamentos com a finalidade de climatizar os espaços interiores úteis, de iluminação, equipamentos de escritório e restauração.

O edifício CEA é um edifício com necessidade de baixa tensão especial de energia elétrica e um valor de 41,41 kW de potência contratada.

O edifício tem um consumo de energia elétrica ativa anual de 125,48 MWh, enquanto ao nível mensal (Figura 4.25), nos meses de verão os valores de consumo de energia elétrica ativa são inferiores em relação aos meses de inverno, sendo julho com 7,02 MWh o mês com menor valor de consumo de energia elétrica ativa e março o mês que se verifica o maior consumo de energia elétrica ativa com 15,25 MWh.

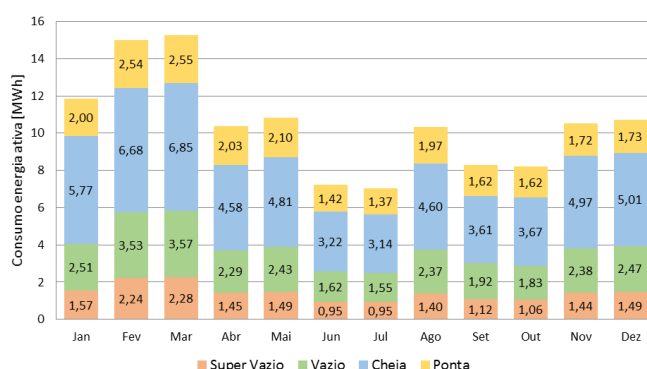


Figura 4.25 - Consumo mensal de energia elétrica ativa do edifício CEA obtidos a partir das faturas elétricas.

Verifica-se que cerca de 45,35 % do valor do consumo anual de energia elétrica ativa corresponde ao período de cheia e 18,07 % ao período de ponta, períodos esses que coincidem com o horário laboral de funcionamento do edifício CEA. Os períodos de vazio e super vazio correspondem anualmente a cerca de 22,70 % e 13,89 %, respetivamente.

Na Figura 4.26 é possível visualizar a média do perfil de carga semanal das necessidades de potência requeridas à RESP pelo edifício CEA. Durante os dias úteis da semana existe uma maior necessidade de consumo logo a potência requerida à RESP é superior, em comparação com os fins-de-semana.

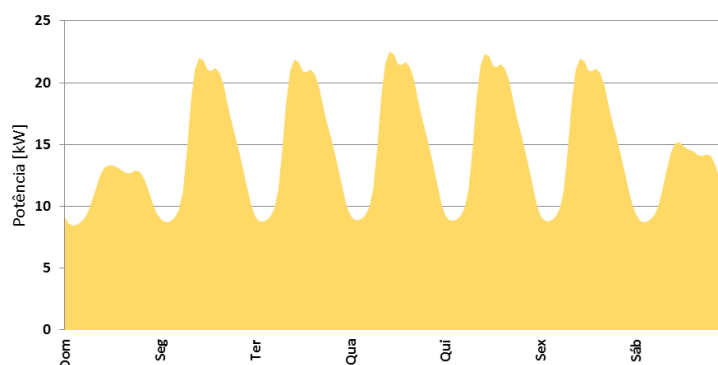


Figura 4.26 - Perfil de consumo médio semanal de energia elétrica do edifício Multisserviços.

Em termos anuais, a variação do perfil de carga horária da potência requerida à rede elétrica oscila entre o valor mínimo de 5,86 kW e o valor máximo de 37,28 kW, obtidos no mês de julho e fevereiro respectivamente (Figura 4.27).

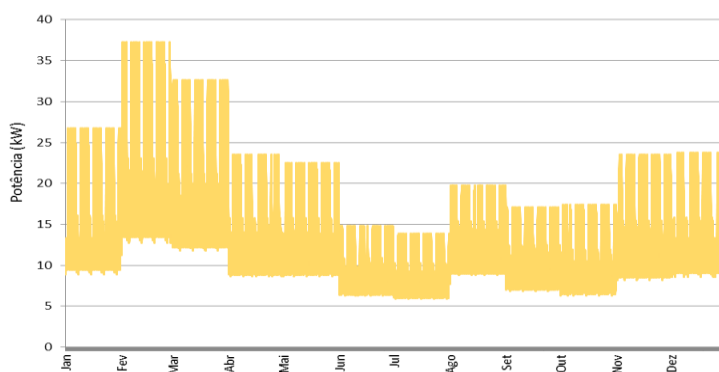


Figura 4.27 - Perfil de consumo mensal de energia elétrica ativa do edifício CEA.

O impacto energético da implementação de uma UPAC no consumo de eletricidade do edifício CEA só com tecnologia solar fotovoltaica encontra-se na Tabela 4.15 no primeiro ano de funcionamento.

Tabela 4.15 - Impacto energético de UPAC com tecnologia solar fotovoltaica no edifício CEA, no primeiro ano de funcionamento.

UPAC	Consumo RESP [MWh]	Produção ER [MWh]	Autoconsumo [MWh]	Injeção RESP [MWh]	Novo Consumo RESP [MWh]
Policristalino	125,48	33,87	32,26	1,61	93,22
Monocristalino		34,74	32,90	1,83	92,58

A instalação de uma UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo policristalino terá a capacidade de reduzir as necessidades de consumo da RESP em cerca de 25,71 %, no primeiro ano de funcionamento. Do total de energia elétrica produzida pela UPAC, 95,26 % será para colmatar as necessidades energéticas do próprio edifício, sendo que o restante valor corresponde ao excedente de produção e que será injetado na RESP.

A UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino terá a capacidade de gerar cerca de 26,22 % das necessidades energéticas do CEA. Ao nível da análise da energia elétrica produzida pela UPAC, a energia elétrica que será consumida no próprio edifício será de 94,72 % e de 5,28 % está associada ao excedente de produção da UPAC.

A análise energética da UPAC com agregação do sistema híbrido em regime de microprodução com as tecnologias solares fotovoltaicas a implementar pode ser consultada na Tabela 4.16.

A UPAC que agrega a instalação para a microprodução com a tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino terá a capacidade de reduzir as necessidades de consumo da RESP em cerca de 30,65%. Do total de energia elétrica produzida pela UPAC, 92,59 % será para colmatar as necessidades energéticas do próprio edifício e o restante valor corresponde ao excedente de produção e que será injetado na RESP.

A UPAC que agrega a instalação para a microprodução com a tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino terá a capacidade de gerar cerca de 31,09% das necessidades energéticas do CEA. Ao nível da análise da energia elétrica produzida pela UPAC, a energia elétrica que será consumida no próprio edifício será de 91,99 % e cerca de 8,01 % está associada ao excedente de produção da UPAC.

Tabela 4.16 - Impacto energético de UPAC com tecnologia solar fotovoltaica e equipamentos em regime de microprodução já instalados no edifício CEA para o primeiro ano de funcionamento.

UPAC	Consumo RESP [MWh]	Produção ER [MWh]	Autoconsumo [MWh]	Injeção RESP [MWh]	Novo Consumo RESP [MWh]
Policristalino e Microprodução	125,48	41,54	38,46	3,08	87,02
Monocristalino e Microprodução		42,40	39,01	3,40	86,48

Nas seguintes análises mensais efetuadas às UPAC serão tidas em conta as tecnologias com valores superiores de produção de energia elétrica das diversas UP analisadas e comparadas anteriormente, uma vez que o que os valores de produção e o comportamento anual são idênticos entre os tipos de tecnologia analisado.

A análise energética mensal pode ser consultada na Figura 4.28, para uma UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino. Destacam-se os meses de junho e julho uma vez que os valores de excedente de produção de energia elétrica que é injetada na RESP atingem os seus máximos nesses meses e isso deve-se, principalmente, ao facto de os valores de consumo de energia elétrica do edifício CEA serem baixos nesse período do ano.

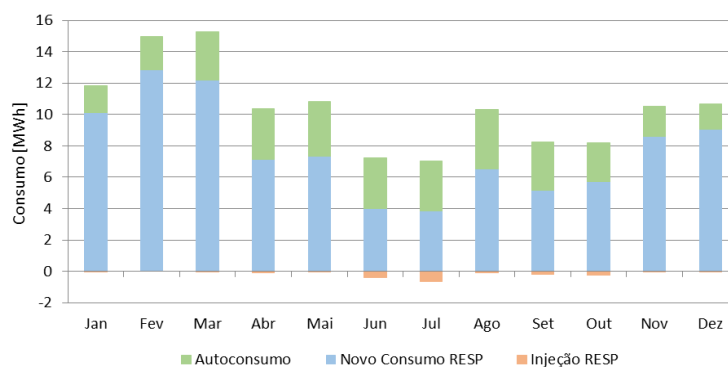


Figura 4.28 - Comportamento mensal do consumo elétrico no edifício CEA com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino.

No mês de julho obteve-se um valor de 0,67 MWh de excedente de produção de energia elétrica, o que corresponde a cerca de 17,35% da energia elétrica produzida na UPAC e uma redução de 45,54% das necessidades de consumo de energia elétrica da RESP. Enquanto no mês de junho os valores de excedente de produção de energia elétrica e injetada na RESP foi de 0,42 MWh, correspondendo a cerca 11,35% da energia elétrica produzida e a uma redução das necessidades de consumo de energia elétrica da RESP de 44,55%.

O valor de excedente de produção apresentou valor nulo no mês de fevereiro, tendo sido obtidos nos restantes meses valores compreendidos entre os 0,004 MWh e os 0,22 MWh, o que corresponde a

0,21% e 8,32% da energia elétrica produzida nesses meses. O CEA obteve nesses meses uma redução das necessidades de energia elétrica da RESP entre 14,26% e 37,59%.

A análise energética mensal à UPAC com a integração das tecnologias aplicadas na microprodução com a tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino pode ser consultada na Figura 4.29. Destacam-se, novamente, os meses de junho e julho uma vez que os valores de excedente de produção de energia elétrica que é injetada na RESP atingem os seus máximos nesses meses, esse facto deve-se aos mesmos motivos referidos anteriormente para a UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino.

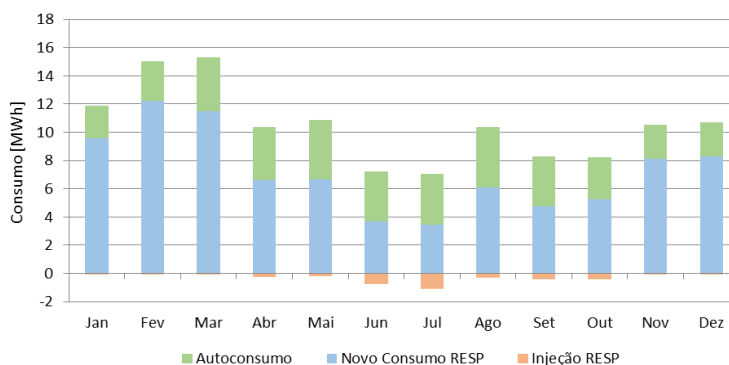


Figura 4.29 - Comportamento mensal do consumo elétrico no edifício CEA com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e equipamentos em regime de microprodução.

Obteve-se para o mês de julho um valor de 1,07 MWh de excedente de produção de energia elétrica, o que corresponde a cerca de 23,18% da energia elétrica produzida na UPAC nesse mês e uma redução de 50,45% das necessidades de consumo de energia elétrica à RESP. Enquanto no mês de junho os valores de excedente de produção de energia elétrica e injetada na RESP foram de 0,71 MWh, correspondendo a cerca 16,77% da energia elétrica produzida e uma redução de 48,82% das necessidades de consumo de energia elétrica à RESP.

Os valores de excedente de produção obtidos nos restantes meses estão compreendidos entre 0,01 MWh e 0,41 MWh, o que corresponde a 0,39% e 12,42% da energia elétrica produzida nesses meses. O CEA obteve nesses meses uma redução das necessidades de energia elétrica da RESP na ordem de 18,42% a 42,27%.

Na análise efetuada a uma semana típica do período de inverno para o sistema UPAC com integração dos equipamentos de microprodução e da tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino é possível identificar a produção de energia elétrica de origem eólica, uma vez que o CEA está localizado numa zona menos exposta da área urbana da cidade de Torres Vedras (Figura 4.30).

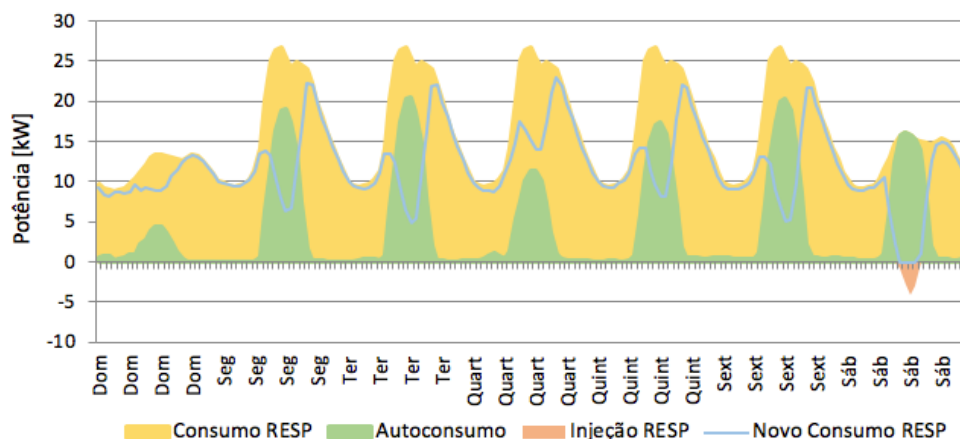


Figura 4.30 - Diagrama de produção e consumo elétrico de uma semana típica de Inverno do edifício CEA com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e equipamentos em regime de microprodução.

Para a mesma UPAC, é possível verificar que numa semana típica do período de verão existe injeção na RESP do excedente de produção de energia elétrica. Esses valores são superiores ao fim-de-semana, em comparação com os dias úteis da semana e isso deve-se, principalmente, à diminuição do consumo de energia elétrica nesses dois dias (Figura 4.31)

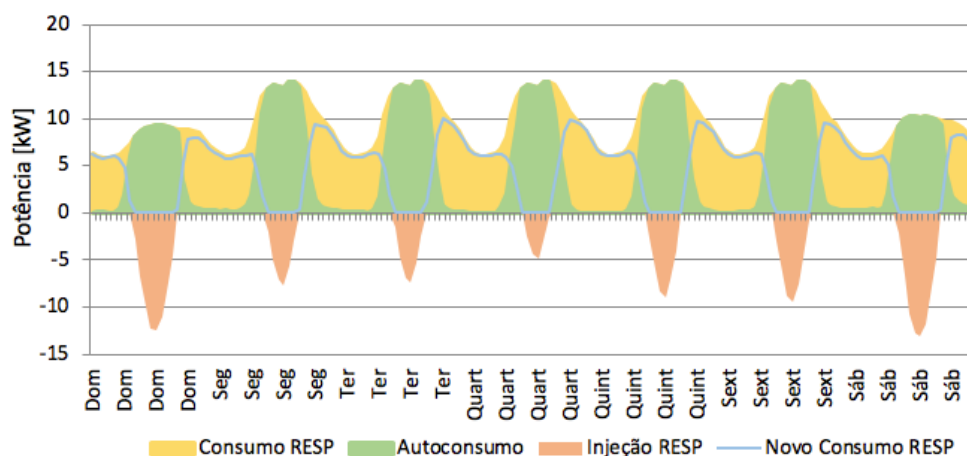


Figura 4.31 - Diagrama de produção e consumo elétrico de uma semana típica de Verão do edifício CEA com implementação da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e equipamentos em regime de microprodução.

4.4 Análise económica aos edifícios municipais

Para a tecnologia solar fotovoltaica serão tidos em conta os valores que se encontram na Tabela 4.17 na análise realizada ao mercado português e europeu.

Tabela 4.17 - Valores de aquisição dos equipamentos para as UP solar fotovoltaica. Valores resultantes da análise ao preço praticados no mercado português.

Módulos solares [€/W]		Inversor [€/W]			Cabo solar 100 m [€]
Policristalino	Monocristalino	PV1	PV2	PV3	
0,54	0,70	0,18	0,15	0,13	71,39

Os equipamentos aplicados nas UPAC com sistemas híbridos, podem ser consultados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Valores de aquisição dos equipamentos para as UP microturbina eólica. Valores resultantes da análise ao preço praticados no mercado português e europeu.

HAWT [€/W]			VAWT [€/W]			Inversor [€/W]			Torre de 13 m [€]
1,5 kW	3 kW	5 kW	1 kW	3 kW	5 kW	WT1	WT2	WT3	
2,89	2,01	1,75	3,19	2,67	2,38	0,96	0,61	0,51	1649,00

A análise económica a ser efetuada ao edifício CEA difere em relação ao edifício Multisserviços uma vez que a UP a ser implementada no edifício CEA será sempre do tipo UPAC, enquanto no edifício Multisserviços será analisada uma UPP e uma UPAC.

- **Multisserviços da C. M. de Torres Vedras**

Encontram-se na Tabela 4.19 os valores de investimento inicial necessário para a implementação de UPP com tecnologia solar fotovoltaica. O custo por cada unidade de potência instalada difere em cerca de 0,18 € nas tecnologias solares fotovoltaicas, sendo que esse valor é influenciado pela diferença de preço do custo de aquisição dos módulos solares, uma vez que os restantes equipamentos são praticamente idênticos nas UP analisadas.

Tabela 4.19 – Investimento inicial para implementação de tecnologias solares fotovoltaicas no edifício Multisserviços.

	Policristalino	Monocristalino
Investimento inicial [€]	49 604,48	64 077,82
Custo [€/W]	0,78	0,96

A análise económica realizada a uma UPP com tecnologia solar fotovoltaica a ser implementada no edifício Multisserviços pode ser conferida na Tabela 4.20 para os diversos indicadores económicos analisados. É possível verificar que os indicadores económicos referentes à tecnologia solar fotovoltaico do tipo policristalino são mais atrativos economicamente por apresentarem um tempo de retorno inferior e um valor atual líquido mais elevado, em comparação com a tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino.

Tabela 4.20 – Indicadores económicos das tecnologias solares fotovoltaicas para uma UPP a ser implementada no edifício Multisserviços.

	VAL [€]	TIR [%]	ROI [%]	T _R
Policristalino	70 038,69	16,30	2,41	6 Anos e 5 meses
Monocristalino	56 209,83	11,95	1,88	8 Anos e 7 meses

Os valores de *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) serão idênticos para UPAC e para UPP, uma vez que os valores de investimento e produção de energia elétrica são idênticos em ambos os casos. O

valor obtido para a tecnologia solar fotovoltaico do tipo policristalino é inferior em quase 0,01 €, em comparação com a tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino (Tabela 4.21).

Tabela 4.21 - LCOE das tecnologias solares fotovoltaicas analisadas para a UP a ser implementadas no edifício Multisserviços.

	Policristalino	Monocristalino
LCOE [€/kWh]	0,0475	0,0577

Na análise económica a uma UPAC é essencial a identificação do valor das tarifas elétricas aplicadas em certos períodos específicos do dia. Para essa análise teve-se em conta os valores que constam na Figura 4.32, tendo sido identificadas quatro tarifas (super vazio, vazio, cheio e ponta) referentes às tarifas de aquisição de energia elétrica ativa e redes de energia elétrica ativa durante o ano de 2016 por parte da C. M. de Torres Vedras no edifício Multisserviços.

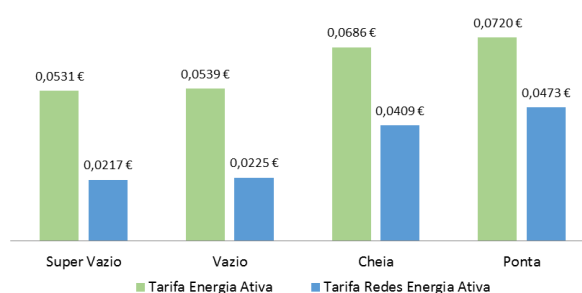


Figura 4.32 - Tarifas de energia elétrica ativa e redes de energia elétrica ativa aplicadas no edifício Multisserviços [Faturas elétricas 2016].

O valor das tarifas é aplicado para um horário de ciclo semanal normal, existindo alteração do horário de inverno e de verão nos dias em que ocorre a alteração da hora. Em ambos os períodos horários foi identificada a existência de três horários específicos diários, um desses horários é ao domingo onde apenas são aplicadas as tarifas de vazio e super vazio. Já ao horário de sábado é adicionada uma terceira tarifa referente ao período das horas cheias e nos dias úteis da semana são aplicadas quatro tarifas, sendo adicionada às tarifas anteriormente descritas uma tarifa referente ao período de ponta (Figura 4.33).

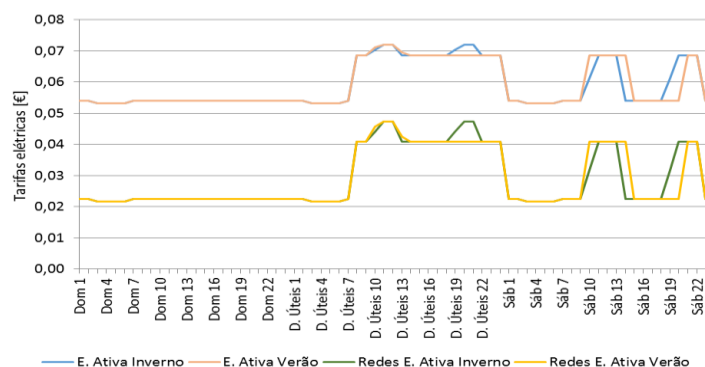


Figura 4.33 - Períodos horários onde é aplicado as tarifas energéticas para o período de Verão e Inverno para o edifício Multisserviços.

Relativamente aos custos anuais associados à aquisição de energia elétrica, o município de Torres Vedras teve uma despesa anual perto dos 38 000 € para o edifício Multisserviços. Desse valor anual cerca de 56,98 % está associado a custos no período de cheia, no período de horas de ponta as

despesas equivalem 22,34 %, os períodos de vazio e super vazio correspondem 13,47 % e 6,25 %, respetivamente. O imposto sobre o consumo de eletricidade tem um impacto de 0,97% do custo anual total.

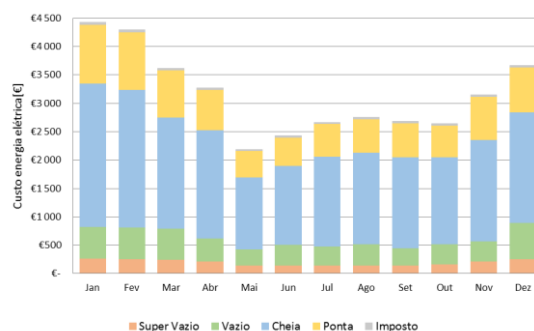


Figura 4.34 - Custo mensal de aquisição de energia elétrica para o edifício Multisserviços.

Na Tabela 4.22 podem ser consultados os indicadores económico referente à instalação de uma UPAC com os dois tipos de tecnologia solar fotovoltaica.

Tabela 4.22 - Indicadores económicos da análise económica a uma UPAC com tecnologias solares fotovoltaicas a ser implementada no edifício Multisserviços.

	VAL [€]	TIR [%]	ROI [%]	T _R
Policristalino	86 118,10	18,01	2,74	5 anos e 11 meses
Monocristalino	72 232,78	13,46	2,13	7 anos e 11 meses

A tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino é mais atrativa, uma vez que obteve valores económicos mais interessantes em todos os indicadores económicos analisados em relação à tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino.

A UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino obteve uma receita anual de 10 267,47 €, que resulta da soma das receitas que provêm da poupança de energia elétrica anual e da comercialização do excedente de produção de energia elétrica à RESP. Enquanto a UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino obteve uma receita anual de 10 063,71 €.

Em termos mensais, julho é o mês em que se atinge o maior valor de receita com 1 188,94 € e dezembro o mês com o menor valor de receita tendo atingido os 447,97 € que provêm na sua totalidade do autoconsumo (Figura 4.35).

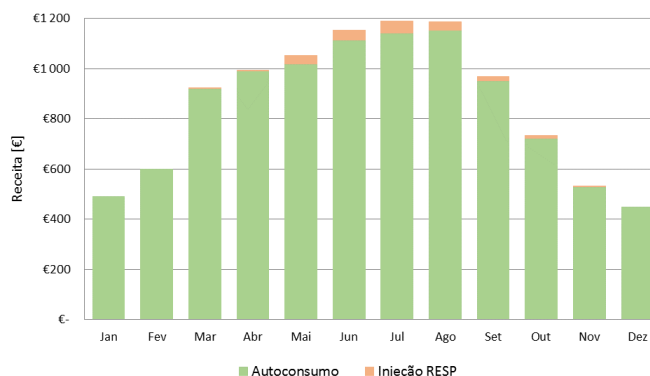


Figura 4.35 – Receita mensal da UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino instalada.

Nas Tabelas 4.23 e 4.24 encontram-se os investimentos iniciais dos sistemas híbridos das UPAC possíveis, a instalar no edifício Multisserviços. Em comparação com as UP já analisadas até ao momento no presente trabalho, os sistemas híbridos terão um custo superior em relação à tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino, da ordem de 0,10 €.

Tabela 4.23 - Investimento inicial para implementação de um sistema híbrido com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino e microturbinas eólicas no edifício Multisserviços.

	Policristalino					
	HAWT 1,5 kW	HAWT 3 kW	HAWT 5 kW	VAWT 1 kW	VAWT 3 kW	VAWT 5 kW
Investimento inicial [€]	57 075,68	59 132,68	61 692,38	55 909,02	60 985,78	64 945,89
Custo [€/W]	0,88	0,89	0,90	0,87	0,92	0,95

Tabela 4.24 - Investimento inicial para implementação de um sistema híbrido com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e microturbinas eólicas no edifício Multisserviços.

	Monocristalino					
	HAWT 1,5 kW	HAWT 3 kW	HAWT 5 kW	VAWT 1 kW	VAWT 3 kW	VAWT 5 kW
Investimento inicial [€]	71 549,02	73 606,02	75 459,13	70 382,36	75 459,13	79 419,24
Custo [€/W]	1,05	1,06	1,08	1,04	1,08	1,11

Dos sistemas híbridos analisados, o sistema que incorpora tecnologia solar fotovoltaico do tipo policristalino e a microturbina VAWT 1 kW foi o que obteve valores mais atrativos ao nível dos indicadores económicos.

Tabela 4.25 - Indicadores económicos da análise efetuada a uma UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino e microturbinas no edifício Multisserviços.

Policristalino	VAL [€]	TIR [%]	ROI [%]	T_R
HAWT 1,5 kW	75 498,53	14,98	2,32	7 anos e 1 mês
HAWT 3 kW	76 645,04	14,28	2,23	7 anos e 5 meses
HAWT 5 kW	69 035,27	13,45	2,12	7 anos e 10 meses
VAWT 1 kW	76 944,64	15,38	2,38	6 anos e 11 meses
VAWT 3 kW	69 846,09	13,64	2,15	7 anos e 9 meses
VAWT 5 kW	64 838,28	12,52	2,00	8 anos e 4 meses

Tabela 4.26 - Indicadores económicos da análise efetuada a uma UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino e microturbinas no edifício Multisserviços.

Monocristalino	VAL [€]	TIR [%]	ROI [%]	T_R
HAWT 1,5 kW	61 611,87	11,42	1,86	10 anos e 6 meses
HAWT 3 kW	58 757,62	10,93	1,80	10 anos e 11 meses
HAWT 5 kW	55 147,63	10,34	1,72	11 anos e 6 meses
VAWT 1 kW	63 058,35	11,69	1,90	9 anos e 1 mês
VAWT 3 kW	55 959,77	19,48	1,74	11 anos e 4 meses
VAWT 5 kW	50 950,22	9,68	1,64	12 anos e 2 meses

Nas Tabelas 4.27 e 4.28 encontra-se os valores de LCOE para os sistemas híbridos para UPAC de possível instalação no edifício Multisserviços.

Tabela 4.27 - LCOE dos sistemas híbridos com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino e tecnologia eólica analisados para a UPAC a ser implementadas no edifício Multisserviços.

Policristalino						
	HAWT 1,5 kW	HAWT 3 kW	HAWT 5 kW	VAWT 1 kW	VAWT 3 kW	VAWT 5 kW
LCOE [€/kWh]	0,0548	0,0568	0,0593	0,0538	0,0586	0,0621

Tabela 4.28 - LCOE dos sistemas híbridos com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino e tecnologia eólica analisados para a UPAC a ser implementadas no edifício Multisserviços.

Monocristalino						
	HAWT 1,5 kW	HAWT 3 kW	HAWT 5 kW	VAWT 1 kW	VAWT 3 kW	VAWT 5 kW
LCOE [€/kWh]	0,0649	0,0668	0,0692	0,0639	0,0686	0,0720

Apesar do sistema híbrido com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino e VAWT de 1 kW apresentar melhor indicadores económicos, não implica que este sistema tenha o maior valor de receita anual. O sistema que gera uma maior receita é o sistema híbrido com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino com microturbina do tipo VAWT de 5 kW, tendo uma receita total anual de 10 341,43 €. Em termos mensais o mês de julho é o que gera maior valor de receita com cerca de 1 193,02 € e o mês de dezembro atinge o menor valor de receita com cerca de 463,70 € (Figura 4.36).

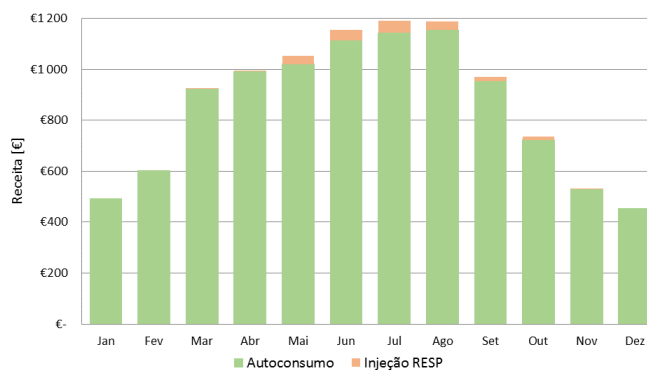


Figura 4.36 - Receita mensal da UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino e VAWT de 5 kW.

• Centro de Educação Ambiental

Na Figura 4.37 estão identificadas as quatro tarifas (super vazio, vazio, cheio e ponta) aplicadas à aquisição de energia elétrica ativa e redes de energia elétrica ativa durante o ano de 2016 para o edifício CEA.

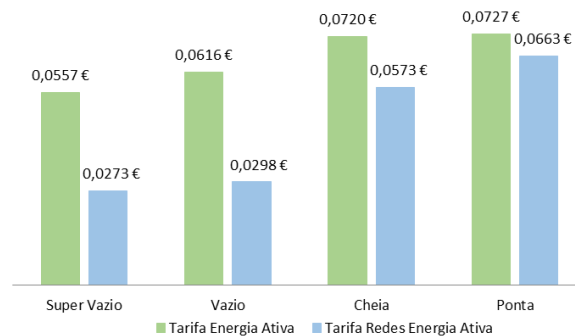


Figura 4.37 Tarifas de energia elétrica ativa e redes de energia elétrica ativa aplicadas no edifício CEA [faturas elétricas 2016].

A informação dos períodos horários das tarifas anteriormente identificadas refere-se a baixa tensão especial (BTE). O valor das tarifas será aplicado para um horário de ciclo diário, existindo alteração do horário de inverno e de verão nos dias em que ocorre a alteração da hora. Quer horário de inverno, quer no de verão existe apenas um horário específico diário, sendo aplicadas as quatro tarifas (Figura 4.38).

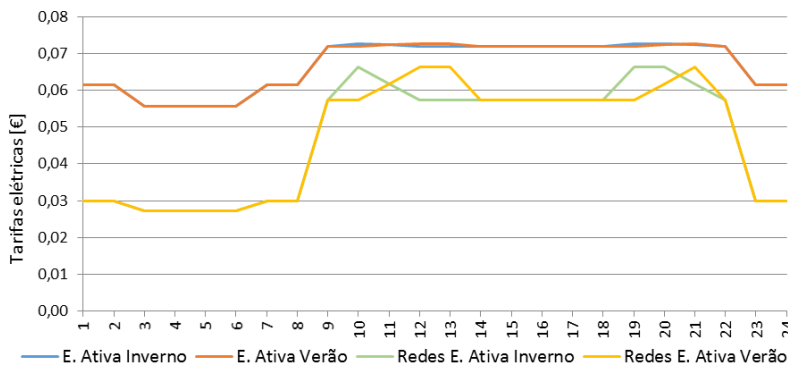


Figura 4.38 - Períodos horários onde é aplicado as tarifas energéticas para o período de Verão e Inverno para o CEA.

Relativamente aos custos anuais associados à aquisição de energia elétrica ativa, às redes de energia elétrica ativa e ao imposto sobre o consumo de eletricidade, o município de Torres Vedras teve uma despesa anual de a rondar os 14 700 € com o edifício CEA. Desse valor anual cerca de 50,11 % está associado a custos no período de cheia, no período de horas de ponta as despesas equivalem 21,46 %, os períodos de vazio e super vazio correspondem 17,73 % e 9,85 %, respetivamente. O imposto sobre o consumo de eletricidade tem um impacto de 0,85 % do custo anual total.

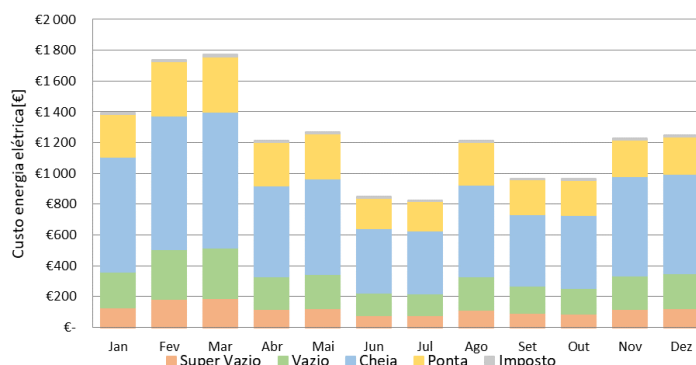


Figura 4.39 - Custo mensal de aquisição de energia elétrica para o edifício CEA.

O investimento associado à implementação de tecnologias solares fotovoltaicas no edifício CEA pode ser verificado na Tabela 4.29. Uma vez mais é notória a diferença dos custos de instalação entre tecnologias solares fotovoltaicas, sendo que esse valor ronda os 0,20 € por cada valor de potência instalada.

Tabela 4.29 – Investimento inicial para implementação de tecnologias solares fotovoltaicas no edifício CEA.

	Policristalino	Monocristalino
Investimento inicial [€]	17 949,44	23 297,50
Custo [€/W]	0,83	1,02

A tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino obteve indicadores económicos mais interessantes em comparação com o monocristalino. Ao nível do tempo de retorno do investimento, o policristalino tem uma diferença de retorno de 1 ano e 10 meses e os valores de TIR e ROI são superiores em 30 %, em comparação com a tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino (Tabela 4.30).

Tabela 4.30 - Indicadores económicos da análise económica a uma UPAC com tecnologias solares fotovoltaicas a ser implementadas no edifício CEA.

	VAL [€]	TIR [%]	ROI [%]	T _R
Policristalino	36 316,29	20,13	3,03	5 anos e 4 meses
Monocristalino	30 637,00	14,93	2,32	7 anos e 2 meses

O valor de LCOE é inferior na tecnologia solar fotovoltaico do tipo policristalino em cerca de 1,26 c€, apesar da tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino ter valores superiores de produção de energia elétrica (Tabela 4.31).

Tabela 4.31 - LCOE das tecnologias solares analisadas para a UPAC a ser implementada no edifício CEA.

	Policristalino	Monocristalino
LCOE [€/kWh]	0,0546	0,0672

Em termos anuais, a receita para a UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino, que resulta da poupança de energia elétrica que não é adquirida à RESP e da venda do excedente injetado na RESP, tem um valor total de 4 059,19 €. Já a UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino tem uma receita anual de 4 145,25 €.

Em termos mensais, e analisando o caso da UPAC com tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino devido ao valor de receita anual ser o mais elevado, verifica-se que é no mês de agosto que se atinge a maior receita com um valor de 466,82 € e que o mês de dezembro é o mês com menor receita com 208,35 € (Figura 4.40).

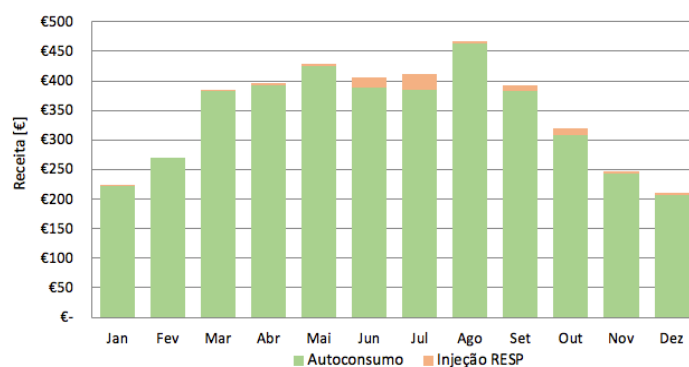


Figura 4.40 - Receita mensal da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino.

Na possibilidade de agregar o sistema híbrido em regime de microprodução e as tecnologias renováveis possíveis de implementar no CEA, atinge-se uma poupança anual de 4 911,99 € com a tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino. Em termos percentuais corresponde a um aumento da receita de 43 % em comparação com a UPAC com a tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino. Ao nível mensal, constata-se que o mês de agosto com 523,87 € continua a ser o mês com maior receita, enquanto no mês com menor receita passou a ser janeiro com 281,34 € (Figura 4.41).

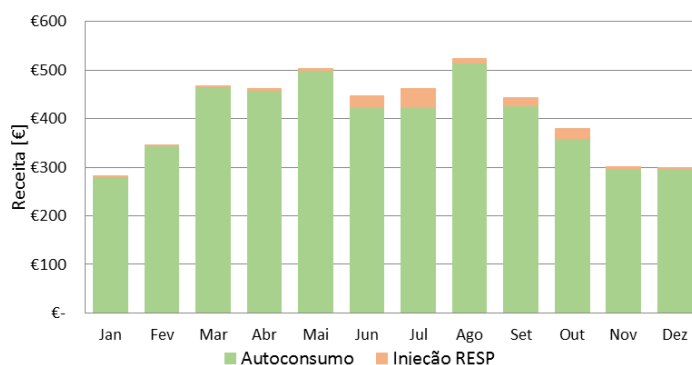


Figura 4.41 - Receita mensal da UPAC com tecnologia solar fotovoltaico do tipo monocristalino e o sistema híbrido em regime de microprodução.

5. Conclusão

A União Europeia (UE) tem tomado decisões importantes ao nível do clima e energia nas últimas décadas através da publicação de um conjunto de regulamentos e de diretivas, com o intuito de reduzir as emissões dos gases de efeito de estufa para a atmosfera. Uma das iniciativas Europeias criadas refere-se ao Pacto dos Autarcas (“Covenant of mayors”), que incentiva, voluntariamente, os governos locais a ir além dos objetivos para o clima e energia propostos pela UE. Em 2010 a C. M de Torres Vedras aderiu a este movimento, entre muitos outros municípios europeus.

As energias renováveis têm tido um papel importante para a obtenção das metas propostas pela UE, tornando-se numa aposta fundamental para a mudança do paradigma energético para uma sustentabilidade energética futura.

No caso Português foram publicados diversos diplomas legais para o desenvolvimento das energias renováveis e instalação de sistemas de pequena potência para produção descentralizada de energia elétrica, tendo culminado no Decreto-Lei nº153 de 20 de outubro de 2014. Este diploma estabelece um enquadramento legal único para a produção de energia elétrica para Unidades de Produção para Autoconsumo (UPAC) e para as Unidades de Pequena Produção (UPP).

O objetivo primordial do presente trabalho consistiu na estimativa do potencial eólico e solar onde se encontram os edifícios propostos pela C. M. de Torres Vedras para possível implementação de tecnologias renováveis (solar e eólica) e a realização de análises energéticas e económicas, de acordo com o estabelecido no Decreto-Lei nº153 de 20 de outubro de 2014.

Neste trabalho foram desenvolvidas e aplicadas metodologias para a identificação do potencial solar e eólico em ambiente urbano, com o intuito de fornecer informações válidas para a implementação de tecnologias renováveis nos edifícios municipais propostos pela C. M. de Torres Vedras e, assim, alcançar as metas estabelecidas pelo Município de Torres Vedras na sua adesão ao Pacto dos Autarcas.

No caso da avaliação do potencial eólico, foi utilizado o modelo de simulação (*Urbawind*) o qual permitiu estimar a produção energética em pontos de interesse situados nos edifícios camarários em análise e na sua envolvente. No entanto, este modelo CFD, trata o terreno como plano, podendo originar desvios na estimativa de produção. Apesar desta limitação, a metodologia desenvolvida, provou ser adequada devido ao facto de permitir o processamento e a modelação de áreas de dimensão significativa dentro da área urbana, as quais não são habitualmente exequíveis com a utilização de outros modelos da mesma natureza. -

Em relação ao potencial solar, foi desenvolvido um modelo digital de terreno urbano onde se incluíram os edifícios propostos pelo município de Torres Vedras. Este modelo digital foi introduzido no programa ArcGIS para obter o mapeamento do potencial solar (recurso à ferramenta *Solar Radiation*) caracterizaram as suas coberturas.

A diferença entre os edifícios, Multisserviços e o Centro de Educação Ambiental (CEA), propostos pelo município de Torres Vedras, foi um desafio interessante ao nível das características arquitetónicas e da possibilidade de agregar novos equipamentos de tecnologias renováveis com os já instalados em regime de microprodução. É de salientar a incerteza relativamente aos perfis de consumos de energia elétrica dos edifícios propostos, uma vez que estes são disponibilizados pela Entidade Reguladora de Serviços Energéticos, que define o perfil conforme a tensão requerida pelo edifício e não pelo tipo de utilização deste.

Na análise energética às UPAC a instalar nos edifícios propostos constatou-se que a tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino tem a capacidade de reduzir em cerca de 26,4 % das necessidades de energia elétrica da RESP para o edifício Multisserviços e 25,7 % para o CEA. Em ambos edifícios, 95

% do total de energia elétrica produzida é consumida no próprio edifício e o restante valor é injetado na RESP. Os valores obtidos na tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino são muito idênticos aos obtidos na tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino, sendo que são superiores em 0,5% em relação à capacidade de suprimir as necessidades de energia elétrica do edifício e inferior pelo mesmo valor percentual na energia elétrica produzida e consumida no próprio edifício, para ambos os edifícios. Verificou-se que existe pouca diferença entre as tecnologias solares fotovoltaicas ao nível da análise ao seu comportamento para uma UPAC.

A implementação de uma UPAC com sistema híbrido (solar e eólico) no edifício Multisserviços apresentou um aumento de 0,2 % na redução das necessidades de energia elétrica da RESP. Esta situação deve-se, principalmente, aos valores de potência de instalação serem muito inferiores para a tecnologia eólica e de o potencial eólico ser muito reduzido na envolvente do edifício em questão.

No CEA, foi analisada a possibilidade de agregar uma UPAC com tecnologia solar fotovoltaico com o sistema híbrido em regime microprodução. Foram obtidos valores entre os 30,7 % e os 31,1 % na redução das necessidades de energia elétrica do edifício e da energia elétrica produzida por essa UPAC que é consumida no próprio edifício entre os 92 % a 92,6 %, demonstrando que a alteração do regime de microprodução para UPAC tem uma enorme influência nos valores de redução das necessidades de energia elétrica da RESP.

Na análise económica para as tecnologias solares fotovoltaicas a serem implementadas nos edifícios, constatou-se que os indicadores económicos (VAL, LCOE, ROI, TIR e tempo de retorno) são mais interessantes e atrativas com a implementação de uma UPAC em relação à UPP. Entre as tecnologias solares fotovoltaicas, a diferença entre o tipo de tecnologias (monocristalino ou policristalino) a ser instalada é acentuada, tanto ao nível dos custos associadas à sua implementação, como nos resultados obtidos nos indicadores económicos analisados, sendo a tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino mais interessante entre os dois tipos analisados.

A UPAC com o sistema híbrido do tipo tecnologia solar fotovoltaica do tipo policristalino com a tecnologia eólica HAWT 1,5 kW é uma possibilidade interessante ao nível económico, como da imagem dada pelo município de Torres Vedras na sustentabilidade energética e ambiental. Ao nível económico os resultados obtidos pelos indicadores económicos são mais atrativos em comparação com a UPAC de tecnologia solar fotovoltaica do tipo monocristalino. A implementação de uma microturbina na envolvente do edifício principal como o Multisserviços demonstra o interesse, a aposta e a valorização que a C. M. de Torres Vedras tem realizado nos últimos tempos aos habitantes do seu município.

Para trabalhos futuros, considera-se interessante analisar outros edifícios municipais (e.g. oficinas municipais) onde difere o consumo de energia elétrica, a localização e a área de implementação das tecnologias analisadas. A necessidade por parte dos edifícios municipais de energia elétrica e térmica é uma realidade, logo o estudo da possibilidade de armazenamento destes tipos de energia é um facto da máxima relevância e a ter em conta em trabalhos futuros desta natureza.

Referências Bibliográficas

- [1] European Parliament, “Pacote Clima-Energia: ‘Três vintes’ até 2020,” 2008.
- [2] Covenant of Mayors Office, “Pacto de Autarcas para o Clima e a Energia,” pp. 1–12, 2015.
- [3] G. Cristian and M. Roscia, “Definition methodology for the smart cities model,” *Energy*, vol. 47, pp. 326–332, 2012.
- [4] H. Chourabi, J. R. Gil-garcia, T. A. Pardo, H. J. Scholl, S. Walker, and K. Nahon, “Understanding Smart Cities : An Integrative Framework,” pp. 2289–2297, 2012.
- [5] D. M. Kammen and D. Sunter, “City-integrated renewable energy for urban sustainability,” *Science (80-.)*, vol. 352, no. May, pp. 922–928, 2016.
- [6] *Decreto-Lei nº 153/2014 de 20 de Outubro do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. Diário da República: Série I, Nº 202.* 2014, pp. 5298–5311.
- [7] P. Lund, “Large-scale urban renewable electricity schemes – Integration and interfacing aspects,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 63, no. November 2012, pp. 162–172, 2012.
- [8] G. Pacetti, M. Passeirini, G. Brebia, C. Latini, *The Sustainable City VII: Urban Regeneration and Sustainability*. WIT Press, 2012.
- [9] L. Batagan, “Smart Cities and Sustainability Models,” *Inform. Econ.*, vol. 15, no. 3, pp. 80–87, 2011.
- [10] H. Ahvenniemi, A. Huovila, I. Pinto-seppä, and M. Airaksinen, “What are the differences between sustainable and smart cities?,” *Cities*, vol. 60, pp. 234–245, 2017.
- [11] T. Simões Esteves, “Identificação do Potencial Renovável para Produção de Electricidade na Perspectiva da Microgeração,” (Tese de Doutoramento em Energia e Ambiente), Faculdade de Ciência da Universidade de Lisboa, 2015.
- [12] INTELI - Inteligência em Inovação, *Índice de Cidades Inteligentes - Portugal*. 2012.
- [13] European Environment Agency, *Urban sustainability issues — Resource-efficient cities: good practice*, no. 24. 2015.
- [14] J. F. Barlow, “Urban Climate Progress in observing and modelling the urban boundary layer,” *Urban Clim.*, vol. 10, pp. 216–240, 2014.
- [15] M. Ray*, A. Rogers, and J. McGowan, “Analysis of wind shear models and trends in different terrain,” *Univ. Massachusetts, Dep. Mech. Ind. Eng. Renew. Energy Res. Lab. Amherst*, no. January, 2016.
- [16] S. Ahmed and A. Bharat, “Wind Field Modifications in Habitable Urban Areas,” *Curr. World Environ.*, vol. 7, no. 2, pp. 267–273, 2012.
- [17] R. M. G. Castro, *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-Hídrica*, 2º Edição. IST Press, 2011.
- [18] ABB, *Quaderni di applicazione tecnica N.13 Impianti eolici*. 2011.
- [19] J.-J. Baik, J.-J. Kim, and H. J. S. Fernando, “A CFD model for simulating urban flow and dispersion,” *J. Appl. Meteorol.*, vol. 42, no. 11, pp. 1636–1648, 2003.
- [20] H. Wang and Q. Chen, “A new empirical model for predicting single-sided , wind-driven natural ventilation in buildings,” *Energy Build.*, vol. 54, pp. 386–394, 2012.
- [21] G. Caniot, M. B. García, and S. Sanquer, “Wind Resource Assessment of the Metropolitan Area of Barcelona,” *Smart Cities 360°*, pp. 339–347, 2015.
- [22] S. Gsanger and J.-D. Pitteloud, “2017 Small Wind Worl Report,” *World Wind Energy Assoc.*,

- 2017.
- [23] T. F. Ishugah, Y. Li, R. Z. Wang, and J. K. Kiplagat, “Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, no. September, pp. 613–626, 2014.
 - [24] “IEC 61400-2 Wind turbines part 2: Small wind turbines,” *Int. Electrotech. Comm.*, 2013.
 - [25] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indraj, and V. H. Krishna, “A review on small scale wind turbines,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, no. April, pp. 1351–1371, 2016.
 - [26] C. Beller, “Urban Wind Energy,” Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. (Risø-PhD; No 89 (EN)), 2011.
 - [27] GREENPRO, “Energia fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projectos e instalação,” 2004. [Online]. Available: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/properties-of-light>. [Accessed: 02-Oct-2017].
 - [28] M. Brito, “Energia Solar - Energia Renováveis,” *Fac. Ciências da Univ. Lisboa*, 2011.
 - [29] J. Hofierka and P. Jozef, “The solar radiation model for Open source GIS : Implementation and applications The solar radiation model for Open source GIS : implementation and applications,” no. October 2002, 2015.
 - [30] M. Šuri, T. A. Huld, and E. D. Dunlop, “PV-GIS : a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe,” *Sustain. Energy*, vol. 24, pp. 55–67, 2005.
 - [31] P. Fu and P. M. Rich, “The Solar Analyst 1 . 0 User Manual,” pp. 1–77, 2000.
 - [32] J. Tovar-Pescador, D. Pozo-v Zquez, J. A. Ruiz-arias, J. Batlles, G. López, and B. J.L., “On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in areas of complex topography,” *Meteorol. Appl.*, vol. 13, no. 3, p. 279, 2006.
 - [33] T. Santos, N. Gomes, S. Freire, M. C. Brito, L. Santos, and J. A. Tenedório, “Applications of solar mapping in the urban environment,” *Appl. Geogr.*, vol. 51, pp. 48–57, 2014.
 - [34] S. Freitas, C. Catita, P. Redweik, and M. C. Brito, “Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 915–931, Jan. 2015.
 - [35] B. T. Griffith and P. G. Ellis, “Photovoltaic and Solar Thermal Modeling with the EnergyPlus Calculation Engine,” *World Renew. Energy Congr. VIII Expo, Denver, Color. August 29-September 3*, no. July, pp. 1–5, 2004.
 - [36] D. M. Bagnall and M. Boreland, “Photovoltaic technologies,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4390–4396, Dec. 2008.
 - [37] P. G. V. Sampaio and M. O. A. González, “Photovoltaic solar energy: Conceptual framework,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. March, pp. 590–601, 2017.
 - [38] *Portaria n.º 14/2015 de 23 de Janeiro do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. Diário da República 1º Série, Nº 1.* 2015.
 - [39] *Portaria n.º 20/2017 de 11 de Janeiro do Ministério da Economia. Diário da República 1º Série, Nº 8.* 2017.
 - [40] E. Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, “Guia de Medição, Leitura e Disponibilização de Dados.” 2016.
 - [41] J. B. Kodysh, O. A. Omitaomu, B. L. Bhaduri, and B. S. Neish, “Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 8, pp. 31–41, 2013.
 - [42] G. A. Baigorria, E. B. Villegas, I. Trebejo, J. F. Carlos, and R. Quiroz, “Atmospheric transmissivity: Distribution and empirical estimation around the central Andes,” *Climatol*, vol.

- 24, pp. 1121–1136, 2004.
- [43] S. Izquierdo, M. Rodrigues, and N. Fueyo, “A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations,” *Sol. Energy*, vol. 82, pp. 929–939, 2008.
- [44] R. Aguiar, “Climatologia e Anos Meteorológicos de Referência para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios (versão 2013),” *Relatório para ADENE – Agência Energia. Laboratório Nac. Energ. e Geol. I.P., Lisboa*, no. versão, p. 55, 2013.
- [45] SolarWorld, “Sunmodule - 25 year limited warranty,” 2017. .
- [46] JinkoSolar, “Limited warranty,” 2014. .
- [47] S. Ekici and M. A. Kopru, “Investigation of PV System Cable Losses,” *Renew. Energy Res.*, vol. 7, no. 2, 2017.
- [48] T. Reference and E. Calculations, “EnergyPlus TM Documentation Engineering Reference The Reference to EnergyPlus Calculations,” no. c, pp. 1996–2015, 2015.
- [49] K. FAHSSIS, G. DUPONT, and P. LEYRONNAS, “UrbaWind, a Computational Fluid Dynamics tool to predict wind resource in urban area,” *Int. Conf. Appl. Energy, Conf. Pap.*, pp. 1–9, 2010.
- [50] B. Blocken, “Computational Fluid Dynamics for Urban Physics: Importance , scales , possibilities , limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations Computational Fluid Dynamics for Urban Physics: Importance , scales , possibilities , lim,” *Build. Environ.*, vol. 91, pp. 219–245, 2015.
- [51] F. M. Camilo, R. Castro, M. E. Almeida, and V. F. Pires, “Economic assessment of residential PV systems with self-consumption and storage in Portugal,” *Sol. Energy*, vol. 150, pp. 353–362, 2017.
- [52] R. Dufo-López, I. R. Cristóbal-Monreal, and J. M. Yusta, “Stochastic-heuristic methodology for the optimisation of components and control variables of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems,” *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 919–935, 2016.
- [53] Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE), “Relatórios Mensais da Evolução do Mercado de Energia Elétrica - OMIE,” 2016. [Online]. Available: <http://www.omie.es/pt/principal/publicacoes>. [Accessed: 13-Dec-2017].
- [54] S. Vardoulakis, B. E. A. Fisher, K. Pericleous, and N. Gonzalez-flesca, “Modelling air quality in street canyons : a review,” *Atmos. Environ.*, vol. 37, pp. 155–182, 2003.
- [55] D. Z. Ajic, H. J. S. F. Ernando, R. C. Alhoun, M. P. Rincevac, and M. J. B. Rown, “Flow and Turbulence in an Urban Canyon,” pp. 203–223, 2011.
- [56] E. Comission, “Urban wind turbines: Technology review,” *Program. Intell. Energy -Europe*.
- [57] S. Eriksson, H. Bernhoff, and M. Leijon, “Evaluation of different turbine concepts for wind power,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, pp. 1419–1434, 2008.
- [58] P. Rich, “Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales,” 1999.
- [59] SolarShop, “Paineis, inversores e cabo solares.” [Online]. Available: <https://www.solarshop.pt/>. [Accessed: 17-Dec-2017].
- [60] LivrePower, “Paineis, inversores e cabos solares, aerogerador, torre eólica e inversores eólicos.” [Online]. Available: <http://livre.pt/>. [Accessed: 17-Dec-2017].
- [61] Merkasol - Energías Renovables, “Paineis solares, aerogerador e torre eólica.” [Online]. Available: <https://www.merkasol.com>. [Accessed: 17-Dec-2017].
- [62] Ecosist, “Paineis e inversores solares.” [Online]. Available: <https://www.ecosist.net>.

[Accessed: 17-Dec-2017].

- [63] Trilhos Energéticos - Soluções Sustentáveis, “Inversor solar e aerogerador.” [Online]. Available: <http://autoconsumoportugal.pt/index.php>. [Accessed: 17-Dec-2017].
- [64] SolarImpact, “Cabo Solar.” [Online]. Available: <https://loja.solarimpact.pt/>. [Accessed: 17-Dec-2017].
- [65] Renugen, “Aerogerador.” [Online]. Available: <http://www.renugen.co.uk/>. [Accessed: 17-Dec-2017].

A. Desfiladeiros Urbanos

Os desfiladeiros urbanos podem ser classificados a partir da relação existente entre a altura do edifício (H) e a distância entre os edifícios com a mesma direção do vento (W) [54]:

- se $H/W \approx 1$, desfiladeiro regular;
- se $H/W \leq 0,5$, desfiladeiro avenida;
- se $H/W \geq 2$, desfiladeiro profundo;

Outro tipo de caracterização dada aos desfiladeiros urbanos está relacionado com o comprimento dos blocos de edifícios (C) e a altura do edifício:

- se $C/H \approx 3$, desfiladeiro pequenos;
- se $C/H \approx 5$, desfiladeiro médio;
- se $C/H \approx 7$, desfiladeiro longo;

Atendendo às características dos desfiladeiros urbanos descritas anteriormente, estes irão influenciar o comportamento do escoamento que ocorre dentro destes. Os estudos dos processos físicos que ocorrem dentro do desfiladeiro urbano têm como interesse a compreensão e a obtenção conhecimento do microclima urbano. Na Figura A.1 está uma representação simples e regular de um desfiladeiro urbano.

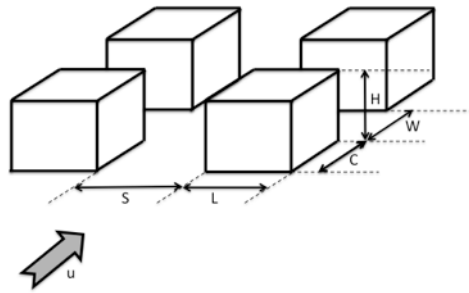


Figura A.1 - Representação de um desfiladeiro urbano regular e as dimensões principais a serem consideradas num conjunto de edifícios (baseado em [11]).

Onde S corresponde ao comprimento entre os edifícios perpendicular à direção do vento, enquanto L corresponde à largura dos edifícios existentes nos desfiladeiros. O valor destas variáveis tem influência no comportamento do escoamento dentro do desfiladeiro urbano, conforme o seguinte [55]:

$$\lambda_{LS} = \frac{L}{S} ; \lambda_{LC} = \frac{L}{C} ; \lambda_{HW} = \frac{H}{W} \quad (\text{A.1})$$

Os edifícios em que se verifica que $\lambda_{LS} < 1$ e que $\lambda_{HW} \ll 1$ pode se efetuar uma análise independente a estes, pois estão suficientemente afastados entre si. Já foi amplamente estudado o comportamento do escoamento nos casos em que os edifícios são longos ($L \gg S$) e o escoamento é perpendicular ao desfiladeiro urbano, tendo sido identificados os seguintes regimes de escoamento bidimensional (2D).

- **Isolado:** Normalmente este tipo de escoamento ocorre em áreas urbanas onde os edifícios e a vegetação presentes são de dimensões reduzidas e a sua distribuição é dispersa [16]. O escoamento é pouco afetado pela existência do edifício e a distância que separa estes é suficiente para restabelecer o escoamento e de se tornar novamente paralelo à base do desfiladeiro. Ocorre quando $0,4 > H/W$, nos casos de os desfiladeiros serem classificados como avenida [55].

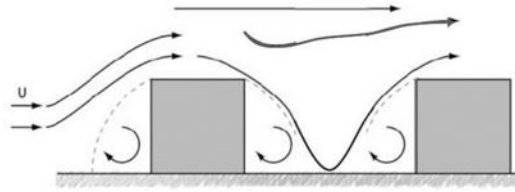


Figura A.2 - Regime escoamento isolado [11].

- ***Esteira de interferência:*** Este regime ocorre quando a altura dos edifícios é mais elevada, tipicamente quatro andares, e a área de ocupação dos edifícios é superior a 30% da área de superfície, criando assim pequenos desfiladeiros urbanos e áreas abertas entre os edifícios [16]. A esteira do edifício interfere com o edifício seguinte, pois uma parte do escoamento que ocorre acima do edifício pode decrescer na parte a sotavento e ocorrendo assim um reforço do vórtice formado no interior do desfiladeiro. Ocorre em situações em que W/H está entre os $1,4 < \frac{W}{H} < 2,4$ [55].

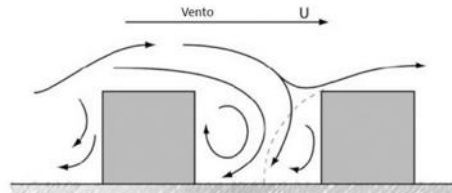


Figura A.3 - Regime escoamento esteira de interferência [11].

- ***Rasante:*** Este tipo de escoamento ocorre em cidades com elevada densidade edificada e os edifícios encontram-se distribuídos de forma compacta e com altura entre eles muito semelhante [16]. Os vórtices que são gerados no interior do desfiladeiro urbano são estáveis, depende de $\frac{W}{H}$, e influenciam pouco o escoamento dominante localizado acima do topo dos edifícios [55]. Este regime de escoamento ocorre em situações que o desfiladeiro urbano e pode ser classificado do tipo regular [54].

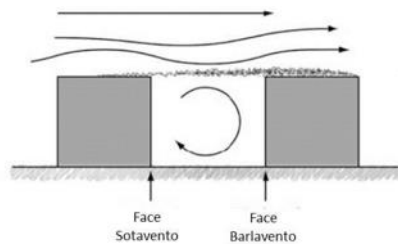


Figura A.4 - Regime de escoamento rasante [11].

B. Tipos de microturbinas eólicas

As turbinas eólicas do tipo HAWT são as mais instaladas e fabricadas para o ambiente urbano. Sendo que a principal razão se deve à elevada eficiência deste tipo de tecnologia e por ser um produto comprovado e amplamente aplicado.

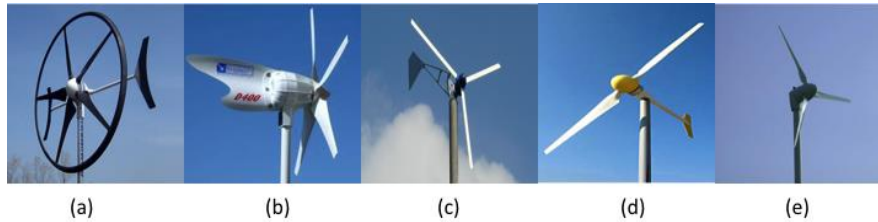


Figura B.1 - Exemplos de turbinas do tipo HAWT: (a) Swift, (b) Eclectic, (c) Fortis Montana, (d) Scirocco, (e) Tulipo [23].

Neste tipo de tecnologia, o rotor precisa de ser posicionado na direção do vento para um maior aproveitamento da energia do vento. Este alinhamento pode ser efetuado através de um motor, definindo-se como sendo um alinhamento ativo, existindo um consumo elétrico por parte das microturbinas, não sendo assim aproveitado ao máximo toda a disponibilidade do recurso eólico e afetar o desempenho da turbina do tipo HAWT. Outro tipo de alinhamento é o passivo, através da colocação de um leme de orientação. Existe ainda a possibilidade deste tipo de tecnologia ser instalado em alturas superiores através de torres, estando mais expostas a ventos mais intensos e assim reduzir a sua área de ocupação, mas trazendo consequência ao nível estético/visual, uma maior exigência da estrutura e dificuldade de manutenção da turbina eólica. Este tipo de tecnologia não lida bem com o comportamento do vento em meio urbano, devido à alteração da direção e à alta turbulência que existe neste meio ambiente [23] [56].

Tabela B.1 - Características das microturbinas do tipo HAWT [23].

Tipos de HAWT	Características do design	Vantagens
Swift (Fig. B.1 a)	<ul style="list-style-type: none"> - Lâminas finas. - Ruído a um nível inferior a 35 dB. - Cercadas por um anel para reduzir vibração. 	<ul style="list-style-type: none"> - Projetado para reduzir ruído. - Adequado para instalações na cobertura.
Eclectic (Fig. B.1 b)	<ul style="list-style-type: none"> - Pás do rotor otimizadas para velocidade do vento reduzidas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pequenas e leves, facilitando a integração em edifícios.
Fortis Montana (Fig. B.1 c)	<ul style="list-style-type: none"> - Pás desenhadas para serem silenciosas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Microturbinas mais aplicadas no uso doméstico.
Scirocco (Fig. B.1 d)	<ul style="list-style-type: none"> - Pitch variável. - Rotor otimizado para duas pás. 	<ul style="list-style-type: none"> - Otimização para velocidades baixas. - Boa relação custo desempenho.
Tulipo (Fig. B.1 e)	<ul style="list-style-type: none"> - Pás fixas que requerem menor manutenção. - Pás projetadas para velocidades baixas. - Emissão de pouco ruído e vibração. 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidade de produzir elevada quantidade de energia elétrica para baixas velocidades do vento.

Já as microturbinas do tipo VAWT são uma tecnologia eólica que tem como vantagens a capacidade de produzir energia elétrica mesmo, com ventos com elevada turbulência e com variação de direção, sendo assim ideal para o aproveitamento do recurso eólico em meio ambiente.

Outra vantagem deste tipo de tecnologia é a localização do gerador e da caixa de velocidades, estes podem estar localizados na parte inferior da microturbina, ficando assim mais perto do nível do solo, o que facilita a sua montagem, no acesso para a manutenção e para a reparação, minimizando os custos associados a estes processos. A maioria das instalações são de pequena escala e grande parte da energia elétrica produzida por este tipo de tecnologia é consumida no local, em comparação com as turbinas do tipo HAWT. As turbinas do tipo VAWT podem ser divididas em duas classes, do tipo resistência (*drag*) ou do tipo sustentação (*lift*), sendo denominadas como Savonius e Darrieus, respetivamente [23].

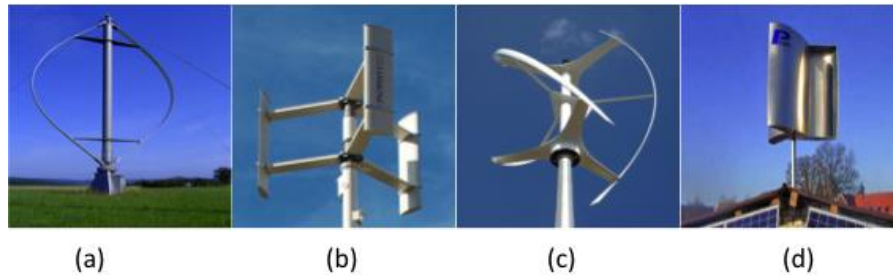


Figura B.2 - Exemplos de microturbinas do tipo VAWT: (a) Darrieus, (b) Giromill, (c) Gorlov e (d) Savonius [22].

As do tipo Darrieus são as turbinas eólicas com diversos protótipos já construídos para análise e investigação, seja em grande ou pequena escala, mas sem um elevado êxito comercial. Isto pode dever-se ao design da turbina, já que o desenho em curvilínea (“forma troposkiana”) das pás implica que esta esteja sujeita apenas à força de tração, dificultando assim a sua construção e aumentando os custos de produção. Existem outros tipos de turbina que tem o mesmo princípio de funcionamento das do tipo Darrieus, as turbinas Giromill que têm como característica a forma da pá ser reta e os perfis serem simétricos e constantes, facilitando assim o transporte e diminuindo os custos de produção, incentivando assim o seu desenvolvimento atualmente. Já as turbinas do tipo Gorlov, são uma variante das turbinas do tipo Giromill, mas com um design das pás em forma helicoidal, podendo ter a capacidade de possuir o auto arranque, baixa vibração e ruído.

Tabela B.2 - Características das microturbinas do tipo VAWT [22] [23] [56].

Tipos de VAWT	Características do design	Vantagens
Darrieus (Fig. B.2 a)	- Maior solidez no rotor, através do uso de três ou mais pás.	- Desenhadas para aplicação em edifícios de elevada altura. - Gerar eletricidade suficiente para baixas velocidades.
Giromill (Fig. B.2 b)	- Variante do tipo Darrieus, mas com pás retas. - Projetada para ter um pitch variável.	- Capacidade de auto arranque e menos vibrações. - Maior eficiência para vento turbulento. - Pás do rotor otimizadas para velocidade de vento reduzidas.
Gorlov (Fig. B.2 c)	- Variante do tipo Darrieus, mas com pás helicoidais.	- Capacidade de auto arranque. - Menos vibrações e ruído.
Savonius (Fig. B.2 d)	- Turbina em forma de “S”.	- Capacidade de auto arranque.

Já as turbinas VAWT do tipo Savonius que tem como princípio de funcionamento a resistência, tem o design em forma de “S” devido às duas formas semicilíndricas que estão dispostas na vertical e com uma ligeira sobreposição ao centro. A rotação tem origem na diferença entre forças de resistência que são aplicadas nas superfícies côncavas e convexas da pá. Têm como particularidades o aproveitamento do fluxo turbulento do vento e da direção do vento, de fazer menos ruído, de ser confiável e robusto, de criar menos vibração e capacidade de arrancar em baixas velocidades, sendo até aplicadas em conjunto com outras turbinas para permitir o seu arranque. Já a sua eficiência não é um ponto muito atrativo neste tipo de turbinas, tendo assim consequência ao nível económico [25] [56].

Fruto da procura e de fundos de apoio existentes nos últimos anos, tem existido desenvolvimento progressivo nos dois tipos de turbinas, principalmente na HAWT, sendo errado assumir e pensar que esta indústria está numa fase madura, existindo ainda muitos desafios na otimização da performance das microturbinas.

Nos últimos anos tem-se efetuado diversos estudos para os dois tipos de turbina, existindo estudos para a HAWT em pequena escala acerca da velocidade do rotor, em termos aerodinâmicos através do estudo do ângulo das pás da turbina eólica (*pitch*) ou do coeficiente de velocidade periférica (*TSR - Tip Speed Ratio*), que está relacionado com a razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente perpendicular à pá. Não existindo muitos estudos relacionados com o desempenho aerodinâmico nas HAWT, em meio urbano, ao nível da intensidade de turbulência e da instabilidade da direção do vento. Ao desenvolver estudos nessas áreas, estes teriam implicações na otimização do design aerodinâmico, em consideração à sua facilidade de fabricação e de operação.

Em relação às VAWT, a maioria dos estudos verificados foi efetuado em 2D, sendo que os estudos mais recentes onde se aplicaram modelos a 2,5D e 3D obteve-se resultados mais interessantes. Apesar do enorme esforço computacional, é essencial no futuro efetuar estudos de simulações de 3D LES (*Large Eddy Simulation*). Outra questão de futuro é projetar um mecanismo de *pitch* variável de baixo custo e viável ao nível do uso, pois verificou-se que com o *pitch* variável o coeficiente de potência aumenta (C_p), logo melhor eficiência da turbina eólica.

Outras questões essenciais, e em comum para os dois tipos de tecnologia eólica, é o estudo detalhado do comportamento do vento em meio urbano e do ruído de funcionamento da turbina eólica. A necessidade de ter um alto coeficiente de potência faz que exista interesse em desenvolver estudos a cerca do comportamento do vento em meio urbano, com o intuito de identificar as zonas onde é possível extrair mais energia proveniente do vento. Já o ruído não pode ser completamente eliminado, mas sim minimizado através da otimização da forma das pás ou do leme [57].

C. Modelos solares

• ArcGIS – Solar Radiation

A determinação do valor de radiação solar direta incidente na célula (Dir_{Total}) resulta do somatório da radiação solar direta ($Dir_{\theta,\alpha}$) com centróide em ângulo zénite θ e no ângulo azimute α de todos os sectores do *Sunmap*.

$$Dir_{Total} = \sum Dir_{\theta,\alpha} \quad (C.1)$$

Sendo $Dir_{\theta,\alpha}$ dado pela seguinte equação:

$$Dir_{\theta,\alpha} = I_0 \cdot \tau^{m(\theta)} \cdot SunDur_{\theta,\alpha} \cdot SunGap_{\theta,\alpha} \cdot \cos(AngIn_{\theta,\alpha}) \quad (C.2)$$

Que depende da constante solar (I_0), da transmissividade da atmosfera no caminho mais curto (τ), do comprimento do caminho ótico relativo ($m(\theta)$), da duração do tempo representado pelo setor do céu ($SunDur_{\theta,\alpha}$), da fração de abertura para o setor do *Sunmap* ($SunGap_{\theta,\alpha}$) e do ângulo de incidência entre o centróide do setor do céu e o eixo normal da superfície ($AngIn_{\theta,\alpha}$).

A determinação do valor de radiação solar difusa incidente na célula (Dif_{Total}) resulta do somatório da radiação solar difusa ($Dif_{\theta,\alpha}$) de todos os sectores do *Skymap* que não estão obstruídos pelo *Viewshed*.

$$Dif_{Total} = \sum Dif_{\theta,\alpha} \quad (C.3)$$

O cálculo do valor da radiação solar difusa pode ser determinado por dois modelos. Em ambos os modelos o cálculo é determinado a partir da equação 35. O modelo *Uniform Sky* assume como constante o valor do fluxo de radiação solar difusa de entrada para todas as direções do céu, enquanto no modelo *Standard Overcast Sky* o valor da radiação solar difusa varia conforme o ângulo zenital, sendo este último modelo o selecionado e aplicado para a determinação do recurso solar disponível.

$$Dif_{\theta,\alpha} = R_{glb} \cdot P_{dif} \cdot Dur \cdot SkyGap_{\theta,\alpha} \cdot Weight_{\theta,\alpha} \cdot \cos(AngIn_{\theta,\alpha}) \quad (C.4)$$

Depende da radiação global normal (R_{glb}), da proporção do fluxo de radiação normal que é difusa (P_{dif}), do período de tempo para análise (Dur), da fração de abertura para o setor do céu ($SkyGap_{\theta,\alpha}$), da proporção de radiação difusa num dado setor do céu em relação a todos os setores ($Weight_{\theta,\alpha}$) e do ângulo de incidência entre o centróide do setor do céu e a superfície intercetada ($AngIn_{\theta,\alpha}$).

Para o modelo *Standard Overcast Sky* o $Weight_{\theta,\alpha}$ é calculado a partir da equação:

$$Weight_{\theta,\alpha} = (2 \cos \theta_2 + 2 \cos \theta_2 - 2 \cos \theta_1 - 2 \cos \theta_1) / 4 \cdot Div_{azi} \quad (C.5)$$

Em que $\cos \theta_2 - \cos \theta_1$ é a delimitação dos ângulos do zénite dos sectores do céu e Div_{azi} refere-se ao número de divisões do azimute no *Skymap*.

O valor final da radiação solar global é dado pelo somatório da radiação direta e difusa para todos os sectores e é repetido para todas as localizações das áreas de interesse.

$$Global_{Total} = Dir_{Total} + Dif_{Total} \quad (C.6)$$

Devido à pequena contribuição por parte da radiação refletida no valor da radiação global, esta não é incluída na metodologia dos cálculos [58].

D. Análise Solar Radiation

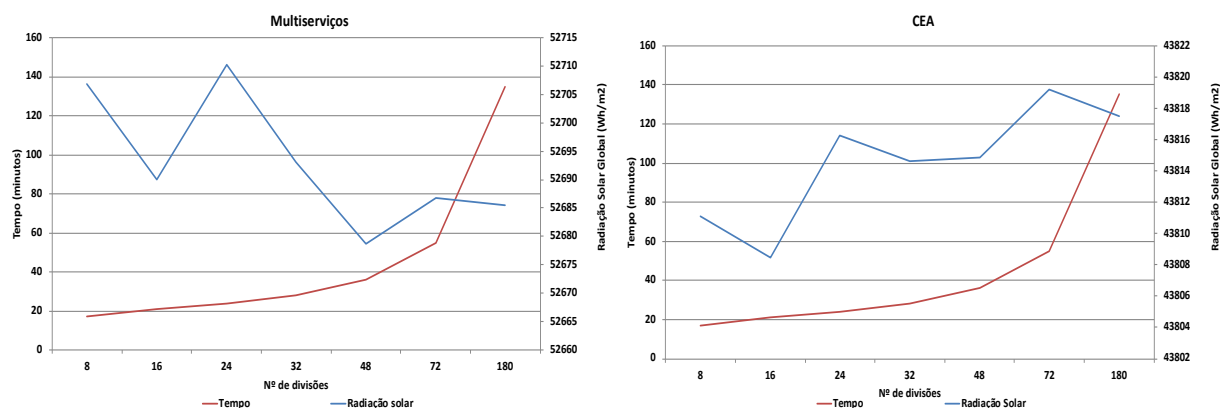


Figura D.1 - Impacto na alteração dos valores de *Calculations Directions* no tempo de duração da simulação e no valor de radiação solar global obtido para cada edifício analisado.

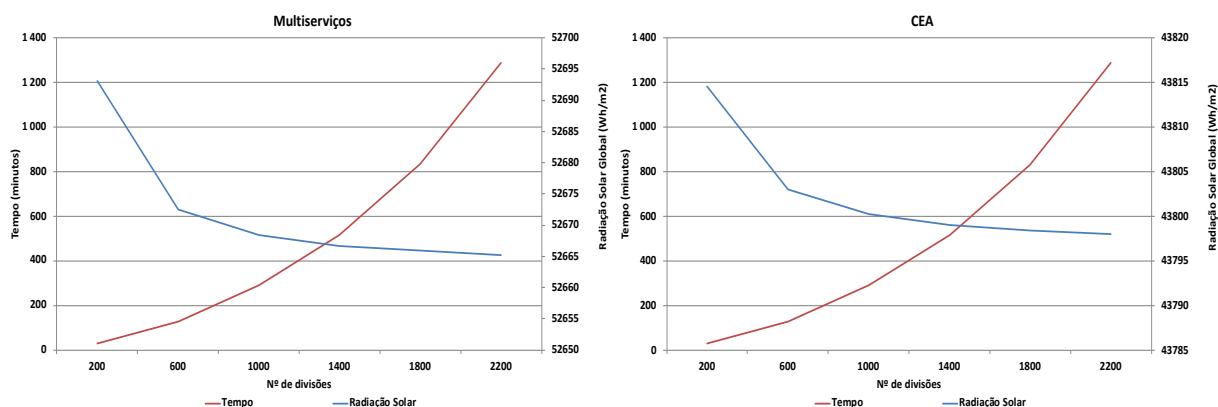


Figura D.2 - Impacto na alteração dos valores de *Sky Size* no tempo de duração da simulação e no valor de radiação solar global obtido para cada edifício analisado.

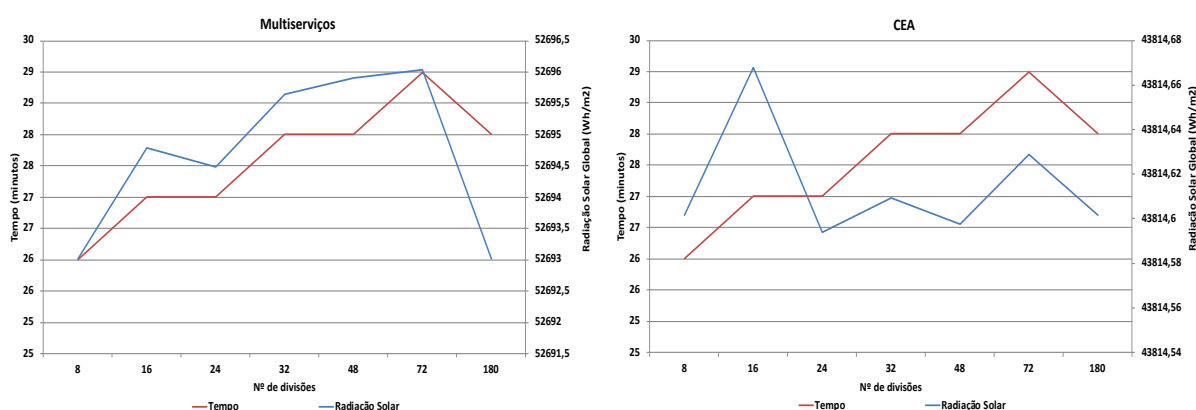


Figura D.3 - Impacto na alteração dos valores de *Azimuth* no tempo de duração da simulação e no valor de radiação solar global obtido para cada edifício analisado.

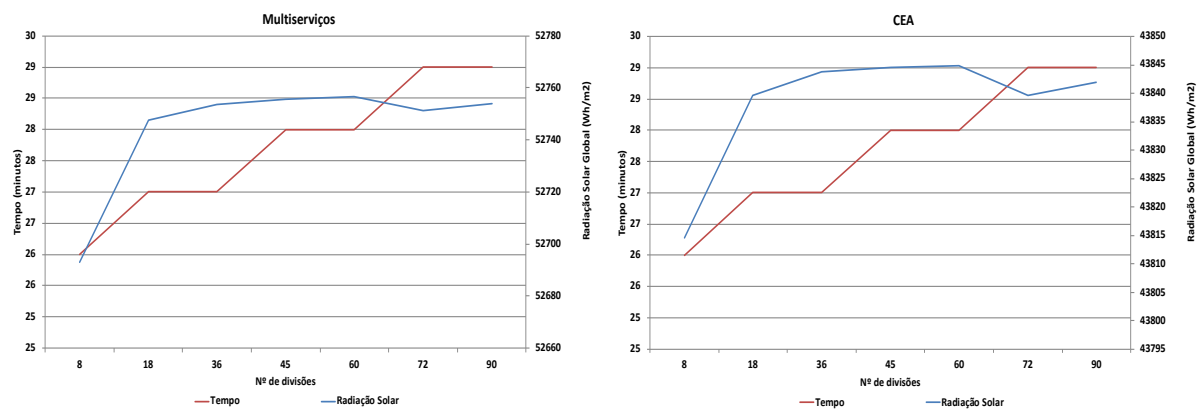


Figura D.4 - Impacto na alteração dos valores de *Zenite* no tempo de duração da simulação e no valor de radiação solar global obtido para cada edifício analisado.

E. Dimensionamento de um sistema fotovoltaico

A realização do dimensionamento do sistema fotovoltaico a ser instalado na cobertura dos edifícios em estudo passa pela seleção dos equipamentos a serem aplicados no sistema solar fotovoltaico e identificar as limitações que surgem ao aplicar o Decreto-Lei n.º 153/2014.

Este último estabelece um limite máximo de potência a ser instalado ($P_{máx. inst.}$), logo o número máximo de módulos ($N^o Módulos$) fotovoltaicos a ser instalado depende do limite máximo estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 153/2014 e da potência do módulo fotovoltaico selecionado ($P_{módulo}$). Com o produto entre o número de módulos fotovoltaicos a instalar ($N_{Módulos}$) e $P_{módulo}$ é possível identificar o valor de potência total instalada (P_{FV}).

$$N_{máx, Módulos} = \frac{P_{máx. inst.}}{P_{módulo}} \quad (D.1)$$

$$P_{FV} = P_{módulo} \times N_{Módulos} \quad (D.2)$$

A escolha do inversor a ser utilizado para o sistema fotovoltaico tem que estar compreendida entre o seguinte intervalo:

$$0,7 \times P_{FV} < P_{máx. inversor, DC} < 1,2 \times P_{FV} \quad (D.3)$$

A potência máxima de entrada do inversor ($P_{máx. inversor, DC}$) pode ser obtida através dos documentos técnicos do equipamento que são fornecidos pelos fabricantes. Como o inversor têm eficiências superiores para cargas elevadas, para sistemas fotovoltaicos com elevada potência instalada será equacionado o uso de vários inversores de potência pequena ou média, em vez do uso de um inversor de potência elevada.

O número de módulos fotovoltaicos a serem instalados por fileira depende do intervalo de valores da tensão de entrada do inversor, uma vez que a tensão do sistema fotovoltaico resulta do somatório das tensões de cada módulo fotovoltaico instalado em série. Sendo assim, a tensão do sistema fotovoltaico deve estar compreendida entre a tensão máxima do inversor e o valor inferior da tensão do inversor.

Num dia de temperatura baixas, onde ocorreu um disparo por falta de tensão da rede, a tensão de circuito aberto dos módulos torna-se elevada. Para precaver danos que possam ocorrer no inversor devido a este aumento de tensão é necessário limitar o número de módulos e assim estabelecer uma tensão máxima da associação em série.

$$V_{OC (T=-10^{\circ}C)} = \left(1 - \frac{35^{\circ}C \times \Delta U}{100}\right) \times V_{OC} \quad (D.4)$$

A V_{OC} corresponde ao valor da tensão em circuito aberto nas condições Standard Test Conditions (STC), normalmente são valores fornecidos pelos fabricantes através dos documentos técnicos dos módulos fotovoltaicos.

Já a determinação da tensão mínima de funcionamento do sistema solar fotovoltaico é determinada no caso de se atingir num dia temperaturas elevadas.

$$V_{MPP (T=70^{\circ}C)} = \left(1 + \frac{45^{\circ}C \times \Delta U}{100}\right) \times V_{MPP} \quad (D.5)$$

Neste caso o V_{MPP} é o valor de tensão no ponto de potência máximo em condições STC.

Após a obtenção dos valores máximos e mínimos de tensão que o sistema fotovoltaico pode atingir, é possível então determinar o número máximo de módulos em série ($N_{S, máx.}$) através da seguinte equação:

$$N_{S, máx.} = \frac{V_{máx, inversor}}{V_{OC (T=-10^{\circ}C)}} \quad (D.6)$$

Já o número mínimo de módulos em série ($N_{S, mín.}$) é obtido através da equação 2.27.

$$N_{S,min.} = \frac{V_{mín, inversor}}{V_{OC} (T=70^{\circ}C)} \quad (D.7)$$

A determinação do número de fileiras em paralelo que o sistema solar fotovoltaico deve de ter em conta a corrente que atravessa cada fileira de módulos. Uma vez que a corrente que atravessa cada fileira de módulos não sofre alterações em ligações em série, esta terá o mesmo valor de corrente gerada por um módulo fotovoltaico.

É essencial efetuar este cálculo sob pena de não danificar o inversor, como tal a corrente que o sistema fotovoltaico irá gerar não deve ultrapassar a corrente máxima suportada pelo inversor. Logo a determinação do número de fileiras ($N_{P,máx.}$) resulta do quociente entre a corrente máxima de entrada do inversor ($I_{máx, inversor}$) pela corrente máxima que atravessa cada fileira de módulos fotovoltaicos (I_{SC}).

$$N_{P,máx.} \leq \frac{I_{máx, inversor}}{I_{SC}} \quad (D.8)$$

Já o número total de módulos fotovoltaicos de um sistema fotovoltaico é o resultado do produto entre o $N_{S,máx.}$ e o $N_{P,máx.}$

$$N_{Módulos} = N_{S,máx.} \times N_{P,máx.} \quad (D.9)$$

F. Curvas de potência

$$\text{Coeficientes de ajuste polonominal} = A_{20}.u^{20} + A_{19}.u^{19} + \dots + A_0 \quad (\text{F.1})$$

Tabela F.1 - Coeficientes aplicados para a melhor representação das curvas de potência das microturbinas VAWT analisadas.

	VAWT 1 kW	VAWT 3 kW	VAWT 5 kW
A20	-3,27558801528736E-12	-3,21537382930789E-12	1,71148288166612E-11
A19	4,47851242240622E-10	4,64950346658080E-10	-2,57268365011903E-09
A18	-2,82536522550949E-08	-3,09863914221046E-08	1,77362916980560E-07
A17	1,09095701563119E-06	1,26243069789396E-06	-7,44973358430952E-06
A16	-2,88387933117903E-05	-3,51682681472834E-05	2,13470620453439E-04
A15	5,53082227562416E-04	7,09914932032983E-04	-4,42590481878660E-03
A14	-7,95752112357092E-03	-1,07378797043471E-02	6,86898178964388E-02
A13	8,76045237567332E-02	1,24139866901317E-01	-8,14177036764940E-01
A12	-7,46082030946448E-01	-1,10921784677333E+00	7,45171396455330E+00
A11	4,93746306801152E+00	7,69716161298693E+00	-5,28892538198442E+01
A10	-2,53694594625939E+01	-4,14699594328115E+01	2,90722845085988E+02
A9	1,00623485329391E+02	1,72621835802320E+02	-1,22947453617694E+03
A8	-3,04751367999683E+02	-5,49827091068440E+02	3,95177604266173E+03
A7	6,93087109765956E+02	1,31990973078776E+03	-9,47496319291434E+03
A6	-1,15533634620309E+03	-2,33530526666524E+03	1,64957937874912E+04
A5	1,36296065294527E+03	2,94694834957579E+03	-2,00704980278805E+04
A4	-1,08012763322006E+03	-2,52475178646085E+03	1,61445890514098E+04
A3	5,33853017033118E+02	1,36259491214918E+03	-7,86300586841001E+03
A2	-1,49565712463863E+02	-4,13201435329894E+02	1,96294394927972E+03
A1	2,06883385009009E+01	5,74394595530539E+01	-1,62866757406442E+02
A0	-2,30510247791856E-01	-7,95414272677051E-01	3,11740040335201E+00

Tabela F.2 - Coeficientes aplicados para a melhor representação das curvas de potência das microturbinas HAWT analisadas.

	HAWT 1,5 kW	HAWT 3 kW	HAWT 5 kW
A20	1,93951367691216E-14	-3,02972164418475E-14	-7,96010095764099E-14
A19	-3,75251234724733E-12	5,88935829318179E-12	1,64282304639564E-11
A18	3,34885718661053E-10	-5,27448901202162E-10	-1,56781688115296E-09
A17	-1,82836796800427E-08	2,88561365361571E-08	9,17870397227835E-08
A16	6,82955133790182E-07	-1,07804689254507E-06	-3,68755176392819E-06
A15	-1,84916352498310E-05	2,91257265021273E-05	1,07747194555324E-04
A14	3,75124060072223E-04	-5,87902898630764E-04	-2,36774801156460E-03
A13	-5,81196445552937E-03	9,03314567013194E-03	3,99126448181911E-02
A12	6,94697031635439E-02	-1,06672230378036E-01	-5,21741671699126E-01
A11	-6,42663767857114E-01	9,70916818633198E-01	5,31199163440393E+00
A10	4,58876733008794E+00	-6,79186760985890E+00	-4,20768071949556E+01
A9	-2,50716690907784E+01	3,62121471356765E+01	2,57704725051674E+02
A8	1,03236350947626E+02	-1,45071638386030E+02	-1,20634724231450E+03
A7	-3,12932835246361E+02	4,27390001002544E+02	4,23975220920296E+03
A6	6,74385230341831E+02	-8,97142678104219E+02	-1,09013668650777E+04
A5	-9,80872896081629E+02	1,27993877829410E+03	1,97597607994903E+04
A4	8,88144989339197E+02	-1,15375147561597E+03	-2,39187429078758E+04
A3	-4,33024825114046E+02	5,92520806486278E+02	1,78037499181013E+04
A2	7,71204685811202E+01	-1,60576640183756E+02	-7,09921697135364E+03
A1	5,46760607866154E+00	2,73235738459564E+01	1,14738899985063E+03
A0	-6,48983579870813E-01	9,29583921737896E-01	-2,64349396837501E+01

Tabela F.3 - Coeficientes aplicados para a melhor representação das curvas de potência da microturbina instalada no CEA.

	Proven 2.5 kW
A20	1,73637437425928E-14
A19	-3,74650745460465E-12
A18	3,73476373948842E-10
A17	-2,28208068056812E-08
A16	9,56175342826265E-07
A15	-2,91158190353442E-05
A14	6,66265174853923E-04
A13	-1,16855164712620E-02
A12	1,58782568533271E-01
A11	-1,67845996954147E+00
A10	1,37836196531327E+01
A9	-8,73509416327478E+01
A8	4,21992840417781E+02
A7	-1,52512728018240E+03
A6	4,01292405540398E+03
A5	-7,39563281360582E+03
A4	9,03089993659601E+03
A3	-6,72096433470482E+03
A2	2,65259692422337E+03
A1	-4,18039484963880E+02
A0	9,60738610493693E+00

G. Análise ao mercado

Tabela G.1 - Custos associados aos módulos fotovoltaicos do tipo policristalino identificados nos mercados português e europeu.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [W]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Módulo Policristalino	REC Peak Energy 265w	265	133,90 €	0,51 €	[59]
	REC Peak Energy 275w	275	137,50 €	0,50 €	[59]
	BenQ 265W	265	154,00 €	0,58 €	[60]
	Jinko 275w	275	126,00 €	0,46 €	[59]
	ECSOLAR 315W	315	165,30 €	0,52 €	[60]
	Amerisolar policristalino	260	157,40 €	0,61 €	[61]
	Amerisolar policristalino	300	177,07 €	0,59 €	[61]
Preço médio dos módulos fotovoltaicos Policristalinos				0,54 €	

Tabela G.2 - Custos associados aos módulos fotovoltaicos do tipo monocristalino identificados no mercado português.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [W]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Módulo Monocristalino	AXIpremium X 300	300	186,99 €	0,62 €	[62]
	LG MonoX Plus 295W	295	197,60 €	0,67 €	[59]
	Solarworld Plus 290w Mono	290	172,90 €	0,60 €	[59]
	SolarWorld 270W Mono SV	270	210,00 €	0,78 €	[60]
	SolarWorld 280W Mono SV	280	218,00 €	0,78 €	[60]
	SolarWorld 290W Mono SV	290	226,00 €	0,78 €	[60]
Preço médio dos módulos fotovoltaicos Monocristalinos				0,70 €	

Tabela G.2 - Custos associados aos inversores solares de 15 kW identificados no mercado português.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [kW]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Inversor fotovoltaico	SMA Sunny Tripower 15000TL	15	2 665,04 €	0,18 €	[62]
	SMA Sunny Tripower 15000TL	15	2 789,30 €	0,19 €	[63]
	SMA Sunny Tripower 15000TL	15	2 403,00 €	0,16 €	[59]
	SMA Sunny Tripower 15000TL	15	3 066,00 €	0,20 €	[60]
Preço médio do inversor fotovoltaico com 15 kW				0,18 €	

Tabela G.3 - Custos associados aos inversores solares de 20 kW identificados no mercado português.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [kW]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Inversor fotovoltaico	SMA Sunny Tripower 20000TL	20	3 072,88 €	0,15 €	[63]
	SMA Sunny Tripower 20000TL	20	2 873,98 €	0,14 €	[62]
	SMA Sunny Tripower 20000TL	20	2 649,24 €	0,13 €	[59]
	SMA Sunny Tripower 20000TL	20	3 431,00 €	0,17 €	[60]
Preço médio do inversor fotovoltaico com 20 kW				0,15 €	

Tabela G.4 - Custos associados aos inversores solares de 25 kW identificados no mercado português.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [kW]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Inversor fotovoltaico	SMA Sunny Tripower 25000TL	25	3 121,63 €	0,12 €	[63]
	SMA Sunny Tripower 25000TL	25	2 909,76 €	0,12 €	[62]
	SMA Sunny Tripower 25000TL	25	3 513,00 €	0,14 €	[60]
Preço médio do inversor fotovoltaico com 25 kW				0,13 €	

Tabela G.5 - Custos associados às bobines de 100 m de cabo solar identificados no mercado português.

Equipamento	Custo [€]	Referência
Cabo solar 6mm2 - Bobine 100 metros	73,00 €	[59]
Cabo solar 6mm2 - Bobine 100 metros	68,00 €	[60]
Cabo solar 6mm2 - Bobine 100 metros	73,17 €	[64]
Preço médio do cabo solar	71,39 €	

Tabela G.6 - Custos associados às turbinas eólicas do tipo HAWT de 5 kW identificados no mercado português.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [kW]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Turbina eólica HAWT	Bornay Wind 25.3+	5	7 330,00 €	1,47 €	[63]
	Bornay Wind 25.3+	5	6 860,00 €	1,37 €	[60]
Preço médio da turbina Bornay Wind 25.3+				1,42 €	

Tabela G.7 - Custos associados às turbinas eólicas do tipo HAWT de 3 kW identificados nos mercados português e europeu.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [kW]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Turbina eólica HAWT	Bornay Wind 25.2+	3	4 940,00 €	1,65 €	[63]
	Bornay Wind 25.2+	3	4 610,98 €	1,54 €	[61]
	Bornay Wind 25.2+	3	5 454,63 €	1,82 €	[60]
Preço médio da turbina Bornay Wind 25.2+				1,67 €	

Tabela G.8 - Custos associados às turbinas eólicas do tipo HAWT de 1,5 kW identificados nos mercados português e europeu.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [kW]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Turbina eólica HAWT	Bornay Wind 15+	1,5	3 937,00 €	2,62 €	[60]
	Bornay Wind 15+	1,5	3 590,00 €	2,39 €	[63]
	Bornay Wind 15+	1,5	3 330,49 €	2,22 €	[61]
Preço médio da turbina Bornay Wind 15+				2,41 €	

Tabela G.9 - Custos associados às turbinas eólicas do tipo VAWT de diferentes potências identificado no mercado europeu.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [kW]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Turbina eólica VAWT	Aeolos 1 kW	1	2 529,40 €	2,53 €	[65]
	Aeolos 3 kW	3	6 624,64 €	2,21 €	[65]
	Aeolos 5 kW	5	9 817,74 €	1,96 €	[65]

Tabela G.10 – Custo associado à torre eólica com altura de 13 m identificado no mercado europeu.

Equipamento	Marca e Modelo	Custo [€]	Ref.
Torre eólica	P750 - 13m	1 649,00 €	[61]

Tabela G.11 – Custo associado ao inversor eólico de 2,2 kW identificado no mercado português.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [kW]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Inversor eólico	ABB PVI-UNO 2.0 OUT-W	2,2	1 553,00 €	0,78 €	[60]

Tabela G.12 - Custo associado ao inversor eólico de 4,4 kW identificado no mercado português.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [kW]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Inversor eólico	ABB PVI-UNO 4.2 OUT-W	4,4	2 073,00 €	0,49 €	[60]

Tabela G.13 - Custo associado ao inversor eólico de 6,2 kW identificado no mercado português.

Equipamento	Marca e Modelo	Potência [kW]	Custo [€]	Custo [€/Wp]	Ref.
Inversor eólico	ABB PVI-UNO 6.0 OUT-W	6,2	2 480,00 €	0,41 €	[60]